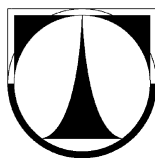


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

Katedra strojírenské technologie



Obor 230V002 strojírenská technologie

Zaměření - slévárenství

**SLEDOVÁNÍ SLÉVÁRENSKÝCH VLASTNOSTÍ SLITIN ZINKU  
PRO VÝROBU ODLITKŮ**

**MONITORING OF FOUNDRY PROPERTIES OF THE ZINC ALLOYS  
FOR CASTS PRODUCTION**

[Doktorská disertační práce]

Autorka: Ing. Bc. Stanislava Krýslová

Školitelka: Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Vedoucí katedry: Doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Liberec, 2008

## ***Anotace***

Doktorská práce se zabývá sledováním slévárenských vlastností slitin zinku pro výrobu odlitků. V této práci byly posuzovány nejpoužívanější slitiny zinku a čistý zinek. Je zde provedeno porovnání jejich slévárenských vlastností.

Práce je rozčleněna na deset kapitol, jenž jsou součástí dvou hlavních částí - řešeršní a experimentální. Všechny kapitoly práce se charakteristicky podílejí na sledování slévárenských vlastností čistého zinku a slitin zinku.

**Řešeršní část práce** je zaměřena na charakteristiku čistého zinku a slitin zinku z hlediska jejich používání ve slévárenství, včetně používaných způsobů výroby odlitků z těchto tavenin. Dále jsou zde charakterizovány některé slévárenské, fyzikální a tepelně-fyzikální vlastnosti tavenin.

**Experimentální část práce** je zaměřena na sledování vybraných slévárenských vlastností posuzovaných tavenin. Nejprve byl vypracován výpočet některých termodynamických veličin s použitím fyzikálních výpočtů pro tavení a krystalizaci čistého zinku a slitin zinku (změna Gibbsovy energie při tavení, změny molární entropie a entalpie při tavení, výpočet tepelné energie vyvinuté při tuhnutí odlitku).

Byla navržena metodika sledování slévárenských vlastností čistého zinku a slitin zinku. Zde byl proveden výpočet tavitelnosti a experimentální sledování slévárenských vlastností - zabíhavost, průběh a doba tuhnutí odlitků, náchylnosti na vznik trhlin, lineárního smršťování odlitků tvaru I. Dále bylo provedeno sledování velikosti dilatace odlitku tvaru válce  $\varnothing 60 \times 70$  mm, který byl odléván do kovové formy studené a předeřáté a do formy z CT směsi. U tohoto měření byl nejprve proveden teoretický výpočet dilatace odlitku. Rovněž bylo provedeno experimentální sledování tepelných procesů při tuhnutí a chladnutí odlitků z čistého zinku a slitin zinku, které bylo doplněno o teoretický výpočet a simulační výpočet.

Ze získaných výsledků naměřených experimentů (průběh a doba tuhnutí odlitků, dilatace odlitků) byly vypočítány hodnoty konstant tuhnutí a součinitele lineárního smrštění.

Výsledky práce porovnávají slévárenské vlastností čistého zinku s nejpoužívanějšími slitinami zinku.

**Klíčová slova:** čistý zinek, slitiny zinku, slévárenské vlastnosti, konstanta tuhnutí, dilatace, součinitel lineárního smrštění, simulační výpočet.

## ***Annotation***

Thesis deals with following of foundry properties of the zinc alloys used for the castings production. In this thesis there were discussion the best used zinc alloys and pure zinc. There were made comparison their foundry properties.

This work is divided into ten chapters which they are part of two main parts - a search and an experimental. All of chapters this thesis take a share in characteristic of following of foundry properties of pure zinc and zinc alloys.

**Search part of thesis** is intent on characteristic of the pure zinc and the zinc alloys in light of their use in foundry production. There are described application methods for castings production from these melt. Further there are characterized some foundry, physical and thermal-physical properties.

**The experimental part of thesis** is intent to following chosen foundry properties research melts. At first there were working-out of calculation of some thermodynamic values with used physical-chemical calculations for melting and crystallization of the pure zinc and the zinc alloys (change of Gibbs energy at melting, change of molar enthalpy and entropy at melting, calculation of thermal energy developed at melting).

There were proposed method of following of foundry properties the pure zinc and the zinc alloys. There were made calculation of solubility and an experimental following of foundry properties - fluidity, course and setting time of castings, predisposition to crazing, linear shrinkage of castings shape I. Further there were made of following dilatation of castings a shape of roll  $\varnothing 60 \times 70$  mm which he was founded to metal mould as cold and preheating and to mould from CT mixture. At this measurement was made calculation of dilatation of castings at the first. Also there was made the experimental following of thermal processes at solidification and cooling castings from the pure zinc and the zinc alloys which it was coupled the theoretical and simulation calculations.

Calculation of values of constant of solidifies and coefficients of linear shrinkage were calculated from measured results (course and setting time of casting, dilatation of casting).

Results of thesis confronted of foundry properties of the pure zinc with the best used zinc alloys.

**Key words:** pure zinc, zinc alloys, foundry properties, constant of solidification, coefficient of linear shrinkage, simulation calculation.

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěla poděkovat zejména mé školitelce paní prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za její cenné rady a odborné připomínky při tvorbě této disertační práce. Zároveň bych chtěla také poděkovat panu Drahoslavu Vinšovi a Ing. Jiřímu Bradáčovi za jejich pomoc při odlévání a experimentálním měření v poloprovozních podmínkách Katedry strojírenské technologie.

Také děkuji svým rodičům a přátelům za jejich podporu, kterou mi po celou dobu studia dodávali.

Liberec, 6.7. 2008

Stanislava Krýslová



**OBSAH**

<b>SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
1.1 CÍLE DOKTORSKÉ PRÁCE .....	13
1.2 PUBLIKACE AUTORA K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE .....	14
1.3 OSTATNÍ PUBLIKACE AUTORA .....	15
<b>2. CHARAKTERISTIKA ČISTÉHO ZINKU A SLITIN ZINKU .....</b>	<b>17</b>
2.1 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY ZINKU .....	24
2.1.1 SLITINY ZINKU PRO TLAKOVÉ LITÍ.....	26
2.1.2 SLITINY ZINKU PRO GRAVITAČNÍ LITÍ.....	29
2.1.3 SLITINY ZINKU PRO OSTATNÍ ZPŮSOBY LITÍ.....	30
2.2 SLÉVÁRENSKÉ A FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI .....	31
2.3 TEPELNĚ-FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI.....	35
<b>3. CHARAKTERISTIKA VÝROBY ODLITKŮ ZE SLITIN ZINKU.....</b>	<b>38</b>
3.1 TLAKOVÉ LITÍ.....	38
3.2 GRAVITAČNÍ LITÍ.....	40
3.3 ODSŘEDIVÉ LITÍ .....	42
3.4 SKLOPNÉ LITÍ .....	44
<b>4. VÝPOČTOVÉ METODY PŘI SLEDOVÁNÍ VLASTNOSTÍ ČISTÉHO ZINKU.....</b>	<b>45</b>
4.1 APLIKACE TERMODYNAMICKÝCH VÝPOČTŮ PRO STANOVENÍ PODMÍNEK TAVENÍ A KRYSTALIZACE ČISTÉHO ZINKU .....	45
4.1.1 VÝPOČET ZMĚNY MOLÁRNÍ ENTROPIE PŘI TAVENÍ ČISTÉHO ZINKU .....	46
4.1.2 VÝPOČET ZMĚNY MOLÁRNÍ ENTALPIE PŘI TAVENÍ ČISTÉHO ZINKU.....	47
4.1.3 VÝPOČET ZMĚNY GIBBSOVY ENERGIE PŘI TAVENÍ ČISTÉHO ZINKU V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ PŘI KONSTANTNÍM TLAKU 101 325 Pa.....	50
4.1.4 VÝPOČET ZMĚNY GIBBSOVY ENERGIE PŘI TAVENÍ ČISTÉHO ZINKU V ZÁVISLOSTI NA TLAKU PŘI KONSTANTNÍ TEPLOTĚ 692,5 K .....	51
4.1.5 VÝPOČET ZMĚNY GIBBSOVY ENERGIE PŘI TAVENÍ ČISTÉHO ZINKU V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ A TLAKU.....	53
4.2 VÝPOČET TEPELNÉ ENERGIE VYVINUTÉ PŘI TUHNUTÍ ODLITKU Z ČISTÉHO ZINKU A SLITIN ZINKU .....	56
<b>5. EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ SLÉVÁRENSKÝCH VLASTNOSTÍ ČISTÉHO ZINKU A SLITIN ZINKU .....</b>	<b>61</b>
5.1 POUŽITÉ SLÉVÁRENSKÉ MATERIÁLY .....	61



<b>5.2</b>	<b>TAVITELNOST .....</b>	<b>62</b>
<b>5.3</b>	<b>ZABÍHAVOST .....</b>	<b>69</b>
<b>5.4</b>	<b>SLEDOVÁNÍ PRŮBĚHU A DOBY TUHNUTÍ ODLITKŮ.....</b>	<b>73</b>
<b>5.5</b>	<b>SLEDOVÁNÍ NÁCHYLNOSTI NA VZNIK TRHLIN .....</b>	<b>80</b>
<b>5.6</b>	<b>SLEDOVÁNÍ LINEÁRNÍHO SMRŠŤOVÁNÍ ODLITKŮ TVARU I BEZ PŘEDPĚTÍ.....</b>	<b>85</b>
<b>5.7</b>	<b>METALOGRAFICKÉ HODNOCENÍ STRUKTURY ODLITKŮ ZE SLITIN ZINKU.....</b>	<b>88</b>
<b>5.8</b>	<b>VYHODNOCENÍ SLÉVÁRENSKÝCH VLASTNOSTÍ.....</b>	<b>91</b>
<b>6.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠŤOVÁNÍ DILATAČNÍCH ZMĚN PŘI TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ ODLITKŮ Z ČISTÉHO ZINKU A JEHO SLITIN .....</b>	<b>94</b>
<b>6.1</b>	<b>VÝPOČET LINEÁRNÍHO SMRŠTĚNÍ ODLITKU TVARU VÁLCE.....</b>	<b>94</b>
<b>6.2</b>	<b>MĚŘENÍ DILATACE ODLITKU .....</b>	<b>98</b>
6.2.1	POPIS MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ DILATACE ODLITKU .....	98
6.2.2	CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH SLÉVÁRENSKÝCH FOREM.....	100
6.2.3	POPIS PROVEDENÝCH EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ DILATACE ZKOUMANÉHO ODLITKU .....	101
<b>6.3</b>	<b>VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ DILATOMETRICKÉ ANALÝZY .....</b>	<b>102</b>
6.3.1	HODNOCENÍ I. ETAPY EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ .....	107
6.3.2	HODNOCENÍ II. ETAPY EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ.....	114
<b>6.4</b>	<b>STANOVENÍ SOUČinitele LINEÁRNÍHO SMRŠTĚNÍ ODLITKU .....</b>	<b>119</b>
<b>7.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ TEPELNÝCH PROCESŮ PŘI TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ ODLITKŮ Z ČISTÉHO ZINKU A SLITIN ZINKU .....</b>	<b>122</b>
<b>7.1</b>	<b>VÝPOČET VELIKOSTI VZDUCHOVÉ VRSTVY MEZI ODLITKEM A OCELOVOU FORMOU.....</b>	<b>122</b>
7.1.1	VÝPOČET VELIKOSTI VZDUCHOVÉ VRSTVY MEZI ODLITKEM TVARU DESKY A OCELOVOU FORMOU PŘEDEHŘÁTOU NA URČITOU TEPLOTU.....	125
<b>7.2</b>	<b>MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ MEZI ODLITKEM A FORMOU .....</b>	<b>130</b>
7.2.1	POPIS MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ PRO ZAZNAMENÁVÁNÍ ČASOVÝCH ZÁVISLOSTÍ TEPLOT VE FORMĚ A V ODLITKU .....	131
7.2.2	CHARAKTERISTIKA POUŽITÉ SLÉVÁRENSKÉ FORMY .....	131
7.2.3	POPIS PROVEDENÝCH EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PŘI SLEDOVÁNÍ ČASOVÝCH ZÁVISLOSTÍ TEPLOT V ODLITKU A V KOVOVÉ FORMĚ.....	133
<b>7.3</b>	<b>VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO POLE ODLITKU A FORMY .....</b>	<b>136</b>
<b>8.</b>	<b>SIMULAČNÍ VÝPOČTY TEPELNÝCH PROCESŮ PŘI TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ ODLITKŮ Z ČISTÉHO ZINKU A SLITIN ZINKU .....</b>	<b>138</b>
<b>8.1</b>	<b>CHARAKTERISTIKA SIMULAČNÍHO PROGRAMU WinCast/SIMTEC .....</b>	<b>138</b>
<b>8.2</b>	<b>POPIS PROVEDENÝCH SIMULAČNÍCH VÝPOČTŮ.....</b>	<b>141</b>
<b>8.3</b>	<b>VYHODNOCENÍ SIMULAČNÍCH VÝPOČTŮ TEPLOTNÍCH POLÍ ODLITKŮ A FORMY .....</b>	<b>145</b>
<b>8.4</b>	<b>SOUHRNNÉ VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH A SIMULOVANÝCH HODNOT .....</b>	<b>145</b>
<b>9.</b>	<b>DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>159</b>



<b>10. ZÁVĚR.....</b>	<b>172</b>
<b>11. SEZNAM LITERATURY .....</b>	<b>178</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>181</b>

**SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ**

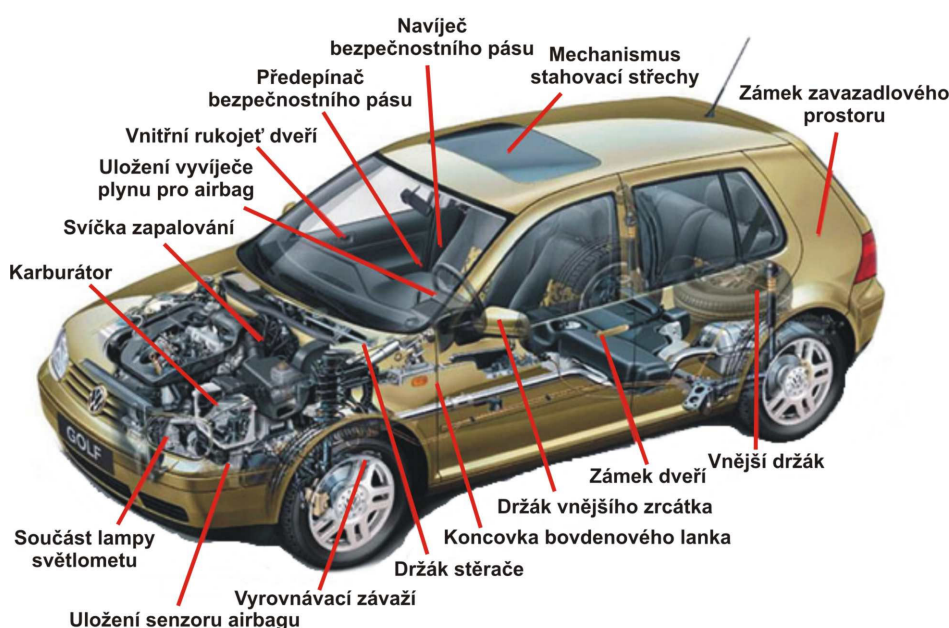
$c_L$	- měrná tepelná kapacita kovu v kapalném stavu [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
$c_S$	- měrná tepelná kapacita kovu v tuhém stavu [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
$C$	- integrační konstanta [1]
$\Delta C_p$	- změna molární tepelné kapacity látky za konstantního tlaku [1]
$d$	- poloměr odlitku [m]
$d_0$	- počáteční délku sledovaného objektu [m]
$D$	- $\varnothing$ odlitku tvaru válce ( $\varnothing D = 60 \text{ mm}$ ) [m]
$\Delta G_{\text{tání}}$	- změna Gibsovy energie při tavení [1]
$\Delta h$	- změna entalpie při tavení [1]
$d(\Delta H)$	- diferenciál přírůstku molární entalpie [1]
$\Delta H_{\text{tání}}$	- změna entalpie při tání [1]
$k$	- konstanta tuhnutí [ $\text{m.s}^{-1/2}$ ]
$\Delta l$	- změna rozměru délky sledovaného objektu [1]
$l_0$	- počáteční délku sledovaného objektu [m]
$L_{KR}$	- latentní krystalizační teplo [ $\text{J.kg}^{-1}$ ]
$m$	- hmotnost [kg]
$m_K$	- hmotnost odlévaného kovu [kg]
$M$	- molová hmotnost [g/mol]
$n$	- počet molů [1]
$p^0$	- hodnota atmosférického tlaku [Pa]
$\Delta p$	- zvýšení tlaku působícího na tání zinku [1]
$P$	- tlak [Pa]
$P_1$	- hodnota tlaku [Pa]
$Q$	- množství tepla pro přehřátí určitého množství [J]
$Q_0$	- celkového množství tepla uvolněného odlitkem [J]
$\Delta r$	- změnu rozměru průměru [1]
$\Delta s$	- změna entropie při tavení [1]
$\Delta S_{\text{tání}}$	- změnu entropie zinku při tání [1]
$\Delta S^0_{\text{tání}}$	- změna entropie při tání [1]
$t$	- dobu tuhnutí [s]
$T$	- teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$dT$	- diferenciál teploty [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\Delta T$	- rozdíl teploty [1]
$T_F$	- počáteční teplota formy [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{F \text{ stř}}$	- střední teplota formy [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_L$	- teplota likvidu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{\text{lití}}$	- teplota taveniny při odlévání [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{O \text{ stř}}$	- střední teplota odlitku [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{OK}$	- konečná teplota odlitku [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{\text{přehřátí}}$	- teplota přehřátí taveniny [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_S$	- teplota solidu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{\text{tání}}$	- teplota tání zinku [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{ZK \text{ stř}}$	- střední teplota ztuhlé kůry odlitku [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{20}$	- teplota okolí [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$V$	- objem [ $\text{m}^3$ ]
$\Delta V$	- změnu molárního objemu nezávislého na tlaku [ $\text{m}^3$ ]
$\Delta V_{\text{tání}}$	- změnu objemu zinku při tání [ $\text{m}^3$ ]



$x$	- velikost lineárního smrštění [%]
$X_F$	- charakteristický rozměr formy [m]
$X_0$	- charakteristický rozměr odlitku (nejčastěji polovina odlitku) [m]
$X_{Pch}$	- tloušťka plynové vrstvy při chladnutí [m]
$X_{PchF}$	- tloušťka spáry vyvolané smršťováním kovové formy [m]
$X_{PchO}$	- tloušťka plynové vrstvy vyvolané smrštěním již ztuhlé části odlitku [m]
$X_{PV}$	- celková hodnota šíře plynové vrstvy [m]
$X_{PVf}$	- tloušťka plynové vrstvy způsobené roztažením kovové formy [m]
$X_{PVo}$	- tloušťka plynové vrstvy způsobené smrštěním pevné kůry tuhnutí odlitku [m]
$X_{PVt}$	- tloušťka plynové vrstvy v době tuhnutí odlitku [m]
$\alpha$	- součinitel lineární roztažnosti, resp. smrštivosti [ $K^{-1}$ ]
$\alpha_{SO}^*$	- součinitel lineárního smrštění odlitku [ $K^{-1}$ ]
$\alpha_{Lso}^*$	- součinitel lineárního smrštění pevné kůry odlitku [ $K^{-1}$ ]
$\alpha_{LSf}^*$	- součinitel lineární roztažnosti materiálu kovové formy [ $K^{-1}$ ]
$\beta$	- součinitel postupu tepla [ $W.m^{-2}.K^{-1}$ ]
$\xi$	- tloušťka ztuhlé vrstvy odlitku [m]
$\xi_D$	- tloušťka ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru desky [m]
$\xi_V$	- tloušťka ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru válce $\varnothing D$ [m]

## 1. ÚVOD

Slévárenská výroba se zaměřuje na výrobu odlitků s potřebnou přesností a kvalitou povrchu při úspoře surovin a energie. K tomuto účelu slouží materiály neželezných kovů. Vedle slitin hliníku mají důležitou úlohu pro výrobu odlitků i slitiny zinku. Rostoucí uplatnění slitin zinku souvisí s jejich specifickými vlastnostmi. K výhodným technologickým vlastnostem slitin zinku přispívá poměrně nízká teplota tání (cca 420 °C) a dobré slévárenské vlastnosti (tavitelnost, zabíhavost, atd.) jak při tlakovém, ale též gravitačním lití. Slitiny zinku mají velké uplatnění při výrobě drobných odlitků členitého tvaru s velkou přesností rozměrů a kvalitou povrchu do hmotnosti 1 kg především pro automobilový, elektrotechnický a spotřební průmysl (výroby kování oken a dveří). Dříve se z těchto slitin vyráběly karburátory zážehových spalovacích motorů. Využití slitin zinku pro výrobu drobných dílů automobilů je patrné z obr. 1-1 (inovovaná verze tohoto obrázku je v příloze č. 1).



Obr. 1-1 Automobil VW s vyznačením dílů - odlitků ze slitin zinku



V současné době, díky automobilovému průmyslu, výroba odlitků ze slitin neželezných kovů systematicky roste. V posledních dvaceti letech (1985 až 2005) je růst výroby s indexem 173 %, opačný trend než u odlitků ze slitin železa. Jejich index výroby činí pouze 68 %. K tomu přispívá největší pokles výroby odlitků z litiny s lupínkovým grafitem, z temperované litiny a pokles výroby odlitků z oceli. Pouze u odlitků z litiny s kuličkovým grafitem je index růstu 174 %. Růst výroby odlitků ze slitin důležitých neželezných kovů (Al, Zn, Cu, Mg) je patrný z tabulky 1.1 Ostatní slitiny neželezných kovů (Sn, Pb, Ni, Co a další), jsou uváděné většinou ve společném objemu. V současné době tvoří nejmenší podíl, který klesá, též tabulka 1.1.

**Tabulka 1.1 Světová výroba odlitků ze slitin neželezných kovů v letech 1985 až 2005**

Výroba odlitků z vybraných slitin neželezných kovů [tuny]												
Rok	1985	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2005
Zn	686,598	630,014	700,8	580,2	1625,15	1451,00	159900	807,00	1001,30	869,4	883,971	955,68
Al	4176,68	3490,64	5257,7	4714,5	3728	5209	5765,3	6368,7	6768,70	7033	7188,37	8348,1
Mg	60,95	69,667	95,00	94,00	95,35	81,36	47,70	49,00	83,00	94,40	311,334	415,30
Cu	1133,50	852,87	1050,4	851,2	2092,50	1165,90	1036,6	1037,2	1238,76	1092	1083,22	789,35
ostatní	616,10	143,06	161,70	122,30	162,70	169,00	82,60	80,00	133,76	80,20	81,458	73,245
Celkem	6673,828	5186,251	7265,6	6362,2	7703,7	8076,26	8531,2	8341,9	9225,72	9169	9548,35	10581,7

Poměr výroby odlitků ze slitin neželezných a železných kovů není v jednotlivých zemích světa rovnoměrný. Rozvoj a růst výroby odlitků ze slitin neželezných kovů se vyvíjí podstatně dynamičtěji v zemích s technicky vyspělým průmyslem než v zemích bývalého východního bloku, kde se projevoval deficit surovin neželezných kovů.

Nejdynamičtější růst a největší objem výroby neželezných slitin vykazuje USA (s indexem výroby 241,5 %) za období 1985 až 2005. Druhý největší objem výroby vykazuje Japonsko, dále Čína. Pak následuje Itálie, Německo, Mexiko, Francie, Tchaj-wan.

Největší objem zaujímá výroba odlitků ze slitin zinku tlakovým litím, nepatrný podíl tvoří výroba odlitků odstředivým litím do forem ze silikonu. Podíl odlitků litých pod tlakem se udržuje na úrovni 9 až 10 %. Index růstu výroby za období 1985 až 2005 je 140 %. Na předním místě ve výrobě odlitků ze slitin zinku je USA, následováno Čínou, dále Mexiko, Itálie, Německo, Japonsko, Francie a Velká Británie.



Rozhodujícím odběratelem těchto odlitků je motocyklový, automobilový a dopravní průmysl, dalším odběratelem je elektrotechnika a elektronika.

Největší naleziště zinku je v Rusku. V České republice jsou naleziště zinkové rudy u Příbrami.

První publikace o odlévání slitin zinku se začaly objevovat na konci 60. let minulého století. Znáмым výzkumníkem byl COPE [1], který ukázal základ vývoje technologie tlakového lití slitin zinku. V roce 1979 své dlouholeté praktické zkušenosti shrnul v publikaci [2]. Hlavní pozornost věnoval  $p$ - $Q^2$  diagramu tlakového lití, specifikům konstrukce odlitků ze slitin zinku, tekutosti a rychlostem plnění dutiny formy taveninou. V 30. letech se výzkumníci začali díky rozvoji tlakového lití odlitku zabývat výpočty pnutí tlakově litých odlitků [3]. Koncem 80. let v publikaci [4] byly shrnuty mechanické vlastnosti slitin zinku při jejich použití při tlakovém lití a bylo charakterizováno jejich použití. V 90. letech minulého století se TAKACH [5] zabýval charakteristikou tlakových strojů pro odlévání slitin zinku. V roce 1992 byla velká pozornost věnována výzkumu tlakově litých odlitků ze slitin zinku různých tvarů a jejich korozním vlastnostem COWIE [6].

Dále se tlakovým litím zabýval HERMAN [7], který koncem 90. let zkoumal specifika konstrukce tlakově litých odlitků jak ze slitin hliníku, tak ze slitin zinku a poukázal na odlišnosti mezi těmito dvěma taveninami. V roce 2000 HERMAN [8] shrnuje aspekty tlakového lití, které uvádějí všechny zásady výroby tlakově litých odlitků ze slitin zinku.

V publikaci [9] MATHEWSON detailně popisuje vědecké a technologické znalosti o zinku a zejména o zinkových slitinách. Vývoj průmyslové výroby zinku v USA popisuje NORRIS ve své publikaci [10]. V publikaci [11] COCKS a WALERS objektivně popsali historii a vývoj výroby zinku v Británii. Je zde popsán vývoj průmyslové výroby zinku, také z chemického hlediska, a dále jeho rozvoj do celé Evropy. MORGAN [12] popisuje zinek a zinkové slitiny nejen z pohledu jejich základních technologických a chemických vlastností, ale také možnosti využití a použití slitin zinku pro různá odvětví. Je zde také podrobně popsána historie vývoje zinku a jeho výroba.

V České republice zinek popisují ve své publikaci PTÁČEK a USTOHAL, [13], kteří charakterizovali použití slévarenských slitin zinku na odlitky a vysvětlili rozdělení slitin zinku podle druhu použité technologie lití. Porovnání uplatnění odlitků ze slitin





zinku se slitinami z hliníku a hořčíku popisuje HRABÁNEK ve své publikaci [14]. OTÁHAL, v publikaci [15], popisuje výrobu odlitků z neželezných kovů a jejich uplatnění v jednotlivých oborech.

Mnoho informací o zinku bylo napsáno zejména v souvislosti s využitím zinku v mosazi a dále ve slitinách s hliníku, např. DZUGAS a VILČKO [16], FABIAN a BOLIBRUCHOVÁ [17].

Dále jsou v poslední době prováděny různé výzkumy týkající se slitin zinku. V roce 1990 popsal BARNHURST [18] své poznatky z teorie a praktického použití slitin zinku pro gravitační lití (jednalo se o slitiny ZnAl8, ZnAl12 a ZnAl27). Další práce jsou zaměřeny zejména na sledování fázové přeměny a struktury slitin zinku při tuhnutí SAVASKAN, TURHAL a MURPHY [19]; DURMAN a MURPHY [20]; KOVACHEVA, DOBREV, ZADGORSKI a LILOVA [21]; LI a CHAO [22]; ZHU, LEE a TO [23]; YANG [24] a další.

I přes rostoucí zájem o zinek a zinkové slitiny ve všech odvětvích průmyslu, zejména automobilovém, nejsou v odborné literatuře porovnány vlastnosti čistého zinku a nejpoužívanějších slitin zinku. Tato doktorská práce je zaměřena na sledování a porovnání technologických a slévárenských vlastností čistého zinku a slitin zinku.

## 1.1 Cíle doktorské práce

1. Shrnutí dosavadních poznatků o zinku a slitinách zinku, včetně chemických, fyzikálních, tepelných a mechanických vlastností a způsobů jejich zpracování v oblasti slévárenství.
2. Aplikovat fyzikálně-chemické výpočty na vlivy, které souvisí s metalurgií, tavením a krystalizací čistého zinku.
3. Navržení metodiky a provedení zkoušek slévárenských vlastností (tavitelnost, zabíhavost, náchylnost na vznik trhlin, smršťení) zinku a jeho slitin.
4. Vytvoření a uplatnění metodiky zkoušek pro stanovení konstanty tuhnutí a dilatačních změn při tuhnutí a chladnutí odlitků ze zinku a jeho slitin odlévaných do různých typů slévárenských forem.
5. Navržení metodiky, včetně použité slévárenské formy a provedení experimentálních měření teplotních polí v kovové formě a odlitku (ze zinku a jeho slitin) při tuhnutí a chladnutí. V návaznosti na podmínky těchto experimentů provést simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků těchto slitin

se záměrem ověření hodnot potřebných tepelně-fyzikálních veličin, tak aby mohly být simulační výpočty uplatněny i pro predikci a ověření navržených technologických zásad při výrobě odlitků ze slitin zinku nebo pro ověření správnosti návrhu slévárenských forem pro výrobu odlitků ze slitin zinku.

## 1.2 Publikace autora k tématu disertační práce

- [1] Krýslová, S., Nová, I., Nováková, I.: Simulační výpočty tuhnutí odlitků ze slitiny ZnAl4 v ocelové formě. ARCHIWUM ODLEWNICTWA, 2006, Ročník 6, PAN - Katowice PL. ISSN 1642-5308.
- [2] Krýslová, S., Nová, I., Nováková, I.: Krystalizace odlitků ze slitin Zn litých pod tlakem. Materials Engineering. Žilina. Issue 3/2006. p. 44-47. ISSN 1335-0803.
- [3] Nová, I., Nováková, I., Krýslová, S.: Sledování součinitele tepelného přechodového odporu mezi odlitkem a kovovou formou pro gravitační lití. Materials Engineering. Žilina. Issue 3/2006. p. 18-20. ISSN 1335-0803.
- [4] Krýslová, S., Nová, I.: Dimensional changes of the castings from Zn alloys in the process of solidification monitoring. 3rd International PhD Foundry Conference. November 2006, Brno. ISBN 80-214-3244-6.
- [5] Nová, I., Krýslová, S.: Sledování rozměrových změn odlitků ze slitin Zn během tuhnutí. Slévárství č.10-11, 2006, s. 410-413. ISSN 0037-6825.
- [6] Nová, I., Krýslová, S.: Zabíhavost slévárenských slitin. Slévárenská ročenka 2007. 1. vydání. s. 105-19. ISBN 978-80-02-01872-8. ISSN 0231-7087.
- [7] Krýslová, S.: The field of temperature of the gravity casting ZnAl4 - steel mould system. Mezinárodní Baťova doktorandské konference, 12.4.2007, Zlín, Česká republika. ISBN 978-80-7318-529-9.
- [8] Krýslová, S., Nová, I.: The crystallization of the Zn alloys at the different conditions cooling. Metal 2007. 16. mezinárodní konference metalurgie a materiálů. Hradec nad Moravicí, Česká Republika. ISBN 978-80-86840-33-8.
- [9] Krýslová, S.: Monitoring of dilatation curves of castings from zinc alloys in the process of solidification. Sborník vědeckých prací Vysoké školy Báňské – Technické univerzity Ostrava. Řada hutnická. 1. vydání. 1/2007, ročník 50. ISBN 978-80-248-1548-0. ISSN 1210-0471.



- [10] Krýslová, S., Zouharová, J.: Monitoring of proceeding and time of solidification of the casting from zinc and his alloys to different types of the casting mould. 4rd International PhD Foundry Conference. 17 October 2007, Brno. s. 20. ISBN 978-80-214-3496-7.
- [11] Krýslová, S.: Study of the influence of teeming temprerature of pure zinc and zinc alloys on foundry properties. 2. Mezinárodní vědecká konference “Nové poznatky v technologiích a technologické informace 2008”. 24.1.2008, Ústí nad Labem. Str. 75. ISBN 978-80-7044-969-1.
- [12] Krýslová, S.: Determinations of the coefficient of linear expansion of shape of roll casting from the pure zinc and zinc alloys. Mezinárodní Baťova doktorandské konference, Zlín 12.4.2008, Česká republika. ISBN 978-80-7318-529-9, CD ROM.
- [13] Krýslová, S. Nová, I.: The wall thickness influence of casting and mould on dilatation property from pure zinc and zinc alloys. Metal 2008. 17. mezinárodní konference metalurgie a materiálů. 13.-15.5.2008, Hradec nad Moravicí, Česká Republika. s. 134. ISBN 978-80-254-1987-8.
- [14] Krýslová, S.: Monitoring predisposition to crack of castings from pure zinc and zinc alloys. 5st International PhD Foundry Conference. 14 May 2008, Brno. s. 20. ISBN 978-80-214-3496-7.

### **1.3 Ostatní publikace autora**

- [15] Nová, I., Krýslová, S., Krýslová, Z. Metody bezdotykového měření teploty. 1.díl. MM Průmyslové spektrum. Vol.8, 11/2004, p. 84-85. ISSN 1212-2572.
- [16] Nová, I., Krýslová, S., Krýslová, Z. Metody bezdotykového měření teploty. 2.díl. MM Průmyslové spektrum. Vol.8, 12/2004, p. 84-85. ISSN 1212-2572.
- [17] Bradáč, J., Krýslová, S.: Opravy odlitků z litiny s kuličkovým grafitem svařováním. XXVIII. Dny svařovací techniky - Sborník přednášek. 2007. Vamberk, Česká republika. ISBN 978-80-02-01924-4.
- [18] Nová, I. Krýslová, S.: Production of Dimensionally Precise Cast Pieces from Aluminium Alloys in Moulds Made of Plaster Mixtures. In: Sborník 5. mezinárodní konference ALUMINIUM 2007 Doksy - Staré Splavy, říjen 2007, s. 103 až 109; ISSN 1335-2334.



- [19] Zouharová, J., Krýslová, S.: Study on influence of the surface finishes of the machine sewing needles on mechanical stress of the machine sewing needles in the sewing process. Bratislava. November 2007. p. 132-136. ISBN 978-80-227-2768-6.

*Doktorská disertační práce byla řešena s podporou výzkumného záměru  
MSM 4674788501.*



## 2. CHARAKTERISTIKA ČISTÉHO ZINKU A SLITIN ZINKU

Zinek (zincum) je prvek II. B skupiny periodické soustavy prvků, zaujímá místo ve 4. periodě, atomové číslo je 30, relativní atomová hmotnost je 65,38. V tabulce 2.1 je uvedena zkrácená část Mendělejevovy periodické soustavy prvků s vyznačením elektronové konfigurace zinku. V tabulce 2.2 je část periodické soustavy prvků s vyznačením kovů podskupin I.B, II.B a III.A. Z této části tabulky lze usuzovat možnosti, se kterými dostupnými prvky je zinek schopen vytvářet slitiny. Mohou to být technicky rozšířené kovy Al, Cu. To potvrzují i technicky používané slitiny zinku (ZnAl4, ZnAl4Cu1, ZnAl4Cu3).

**Tabulka 2.1 Elektronová konfigurace zinku a prvků podskupiny II.B** [vlastní tabulka]

Podskupiny II.B - kovy skupiny zinku										
Protonové číslo	Značka prvku	Relativní atomová hmotnost	Počet elektronů ve vrstvě							Oxidační stupeň
			K	L	M	N	O	P	Q	
30	Zn	65,38	2	8	18	2				II
48	Cd	112,40	2	8	18	18	2			II
80	Hg	200,59	2	8	18	32	18	2		I, II

Vrstvy K, L, M u atomu zinku jsou zaplněny příslušným počtem elektronů (K = 2, L = 8, M = 18, ve vrstvě N jsou umístěny 2 elektrony na hladině 4s. Zinek má celkem 30 elektronů s touto elektronovou konfigurací:  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2$ . Počet valenčních elektronů je 2 - tj. rozhodující pro fyzikální a chemické vlastnosti zinku. Poznámka: atomové číslo Zn je 30 a relativní atomová hmotnost je 65,38.

**Tabulka 2.2 Přehled kovů v podskupinách I.B, II.B a III.A** [vlastní tabulka]

Grupy		
11	12	13
		III.A
		B <sup>*)</sup>
		5
I.B	II.B	Al
		13
29 Cu	30 Zn	Ga
		31
47 Ag	48 Cd	In
		49
79 Au	80 Hg	Tl
		81

**Poznámka:** <sup>\*)</sup> Bór je polokov.



Zinek je modrobílý lesklý kov s velmi malou krystalizační schopností (lískovitě krystalický), takže ve stavu litém krystalizuje vždy hrubě. Teplota tání je 419 °C. Teplota vypařování je 905,7 °C za normálního tlaku (cca 0,1 MPa). Hustota zinku při teplotě 20 °C činí 7130 [kg.m<sup>-3</sup>]. Hustota zinku při teplotě 419 °C je cca 6590 [kg.m<sup>-3</sup>]. V tabulce 2.3 jsou uvedeny vybrané vlastnosti čistého zinku [25].

**Tabulka 2.3 Vybrané vlastnosti čistého zinku [25]**

Protonové číslo Z	Relativní atomová hmotnost Ar	Teplota tání T <sub>tá</sub> [°C]	Teplota varu T <sub>v</sub> [°C]	Hustota ρ [kg.m <sup>-3</sup> ]	Hustota ρ při likvidu [kg.m <sup>-3</sup> ]	Pevnost v tahu Rm [MPa]
30	65,38	419	905,7	7130	6590	120

Zinek krystalizuje v šesterečné soustavě, což se při krystalizaci projevuje vznikem sloupcovitých krystalů. Pevnost této struktury se pohybuje od 50 do 55 MPa, avšak pevnost ve směru kolmém k těmto krystalům je 15 MPa. Z tohoto důvodu se používají slitiny zinku a současně je to vysvětlení, např. proč je nutno odlévat slitiny zinku vysokotlakým způsobem do kovových forem. Jen ve výjimečných případech se slitiny zinku odlévají do pískových forem (použité slitiny obsahují vyšší procento hliníku, podle druhu slitiny tj. 8, 12 a 27 % Al). Zvyšující se obsah hliníku dodává slitinám zinku pevnost.

V příloze č. 2 jsou uvedeny hodnoty fyzikálních a chemických veličin čistého zinku podle MÁLKA [26].

Zinek lze identifikovat v řadě předmětů, které byly zhotoveny již ve starověku ze slitin mědi, jenž můžeme klasifikovat jako mosazi. Zinek nebyl však do těchto slitin přidán jako legura, neboť jeho výroba nebyla známa. Byl v nich náhodně přimíšen z použitých měděných rud [25].

**Poznámka:** Ve starověku byl zinek neznámý, ve středověku jsou o něm pouze ojedinělé zprávy. V 17. stol. se začal dovážet do Evropy z Indie. Redukcí ZnS (sfaleritu) připravil kovový zinek poprvé v roce 1721 J. H. Henkel. V Anglii zavedl výrobu zinku ve velkém měřítku Isac Lawson. Objevení zinku se datuje k roku 1695, avšak výrobu zinku pražením zinkové rudy a kondenzací zinkových par ve chladičích zřejmě jako první objevili Číňané. V Evropě (v Anglii) byla výroba zinku patentována teprve v roce 1739. V polovině 18. století se rozvinula v Německu (Porýní), koncem 18. století se rozšířila do Švédska, Slezska, Korutan a Belgie. V USA se zinek začal vyrábět v roce 1839. Po objevení vhodných rud na Altaji a v oblasti Kavkazu se počátkem 20. století rozvinula výroba zinku. Historie zinku a jeho slitin je uvedena v příloze č. 3.

Zinek se v přírodě vyskytuje nejčastěji jako sulfid. Nejvýznamnější zinkovou rudou je sfalerit  $\text{ZnS}$ , obr. 2-1, zvaný též zinkové blejno. Sfalerit se pražením převádí na  $\text{ZnO}$ .



Obr. 2-1 Zinková ruda - sfalerit ( $\text{ZnS}$ ) [13]

Vedlejší produkt  $\text{SO}_2$  se zpracovává na kyselinu sírovou. Redukce oxidu zinečnatého na kovový zinek se provádí v retortových pecích ohřevem směsi koncentráту  $\text{ZnO}$  s drobným koksem při teplotě asi 1200 až 1300 °C. Zinek zbavený kyslíku a převedený za těchto vysokých teplot do plynného stavu je odváděn do sběrných předloh, kde při teplotě 600 °C kondenzuje. Touto technologií se získává zinek s čistotou asi 98 %.

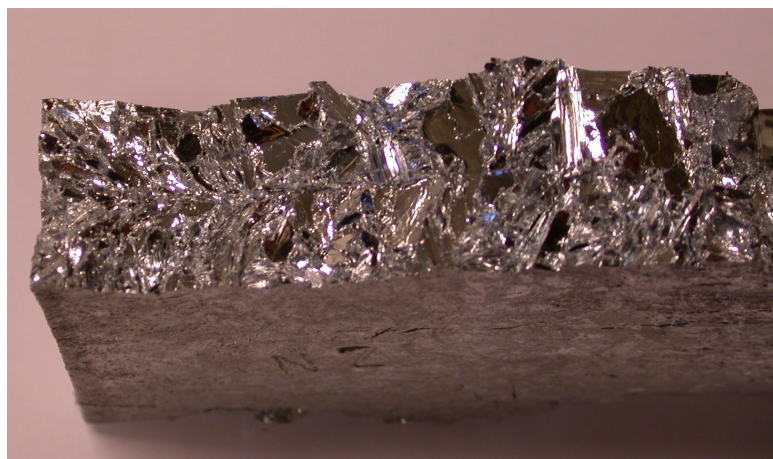
Zinek s vyšší čistotou se vyrábí elektrolyticky (schématické zobrazení této výroby je v příloze č. 4). Vypražené rudy se vyluhují kyselinou sírovou a výluh se podrobuje elektrolýze. Vedlejším produktem elektrolýzy bývá kadmium nebo olovo, které mohou být obsaženy v zinkových rudách. Zinek je dodáván na trh s čistotou odstupňovanou v rozmezí 98,5 až 99,995 hmot. % Zn podle účelu dalšího použití. Na vlastnosti zinku nepříznivě působí příměsi olova, železa, kadmia a cínu, méně škodlivé jsou příměsi arzenu, křemíku, antimonu, vizmutu, případně také stříbra.

Používané způsoby spolehlivé kontroly a regulace obsahu nečistot umožňují udržet na dobré úrovni vlastnosti závislé na čistotě materiálu (rozměrová stabilita, interkrystalická koroze, mechanické vlastnosti, obrobiteľnosť). V tabulce 2.4 je uveden přehled nečistot v primárně vyráběném zinku [13].

**Tabulka 2.4 Přehled nečistot v primárně vyráběném zinku dle ČSN EN 1179 [13]**

<b>Třída kvalifikace</b>	<b>Pb max.</b>	<b>Cd max.</b>	<b>Fe max.</b>	<b>Sn max.</b>	<b>Cu max.</b>	<b>Al max.</b>	<b>Čistota Zn</b>	<b>Příměsové prvky celkem</b>
Z1	0,003	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	99,995	0,005
Z2	0,005	0,005	0,003	0,001	0,002	-	99,99	0,01
Z3	0,030	0,010	0,02	0,001	0,002	-	99,95	0,05
Z4	0,450	0,010	0,05	-	-	-	99,50	0,50
Z5	1,400	0,010	0,05	-	-	-	98,50	1,50

Čistý zinek se dobře odlévá, ale odlitky mají špatné mechanické vlastnosti. Proto se pro odlévání používají slitiny zinku. Čistý zinek se pro odlévání používá velmi zřídka. Na obr. 2-2 je uvedená dendritická struktura zinku.

**Obr. 2-2 Dendritická struktura zinku (vlastní snímek)**

Na povrchu čistého zinku a slitin zinku se na vzduchu vytváří vrstva uhličitanu  $4\text{Zn}(\text{OH})_2\cdot\text{CO}_2$  šedé barvy, která je ve vodě téměř nerozpustná a chrání je před oxidací. Výrobky mohou být korozně napadeny ve styku s destilovanou vodou, vodní párou, kyselinami a zásadami. V elektricky vodivém styku s jinými kovy mohou být ve vlhké atmosféře napadeny elektrokorozí. Slitiny zinku jsou naopak velmi odolné proti dlouhodobému působení benzínu a olejů, což je spolu s jejich velmi dobrou slévateľností předurčilo k odlévání tvarově složitých odlitků, např. automobilových karburátorů.

Výrobky, resp. odlitky ze slitin zinku, se nedoporučuje používat v horké páře, která vyvolává korozi, naopak horká voda těmto odlitkům neškodí.





K povrchové úpravě odlitků ze slitin zinku se často používá galvanické pokovování, kterým se nanáší vrstva mědi, niklu, chromu, mosazi, stříbra, případně i zlata.

Obrábění slitin zinku lze provádět běžnými nástroji použitím rychlořezných ocelí, keramiky nebo slinutých karbidů, tím lze dosáhnout lepší jakosti povrchu.

Pájení odlitků ze slitin zinku běžnými Pb-Sn pájkami lze provádět především tehdy, jsou-li galvanicky poniklovány. K pájení galvanicky nepokoveného odlitku je vhodná pájka o složení (hmot. %) 82,5 % Cd a 17,5 % Zn. Odlitky ze slitiny zinku lze svařovat plamenem s redukční atmosférou. Jako přídatný materiál se používá tyčinka odlitá ze slitiny obdobného složení jako má samotný odlitek, [27].

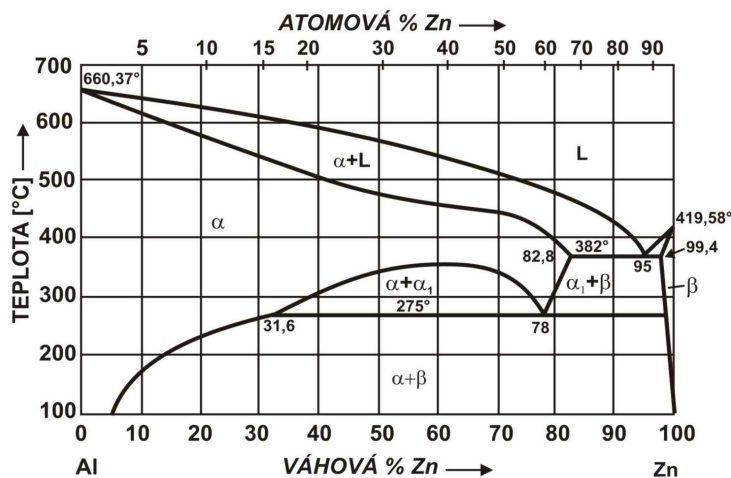
Základní bázi všech prakticky používaných slitin zinku je soustava Zn-Al. Rovnovážný diagram Zn-Al, resp. Al-Zn, viz obr. 2-3 a 2-4, je typem rovnovážného diagramu s primární fází s omezenou rozpustností přísadového prvku a se vznikem eutektika. Rovnovážný binární diagram na obr. 2-4 je publikován v zahraničí MARPHY [28] a ukazuje více oblastí v partii od 40 do 73 % Zn, zde se nachází fáze, která je označovaná jako  $\beta$ . V tomto diagramu fáze bohatá na zinek se označuje  $\eta$ . To je hlavní odlišnost, proti binárnímu diagramu uvedeném na obr. 2-3, kde fáze bohatá na zinek je označovaná jako  $\beta$ .

Z rovnovážného diagramu na obr. 2-3 je patrné, že eutektikum je tvořeno fází Zn a ZnAl. Eutektická teplota je 382 °C při obsahu 95 % Zn. Oba kovy jsou v kapalném stavu dokonale rozpustné. V tuhém stavu je jejich rozpustnost omezená, avšak v hliníku se rozpouští značné množství zinku (cca 35 % při eutektické teplotě 382 °C). Rozpustnost hliníku v zinku je velmi malá (1 % při eutektické teplotě), za normální teploty je pouze 0,05 %. Při eutektické teplotě se tavenina rozpadá na eutektikum  $\alpha_1 + \beta$ . Při eutektoidní teplotě, která je 275 °C dochází k eutektoidní přeměně  $\alpha_1 \rightarrow \alpha + \beta$ . Rozmezí této eutektoidní přeměny je od 31,6 do 78 hmot. % Zn.

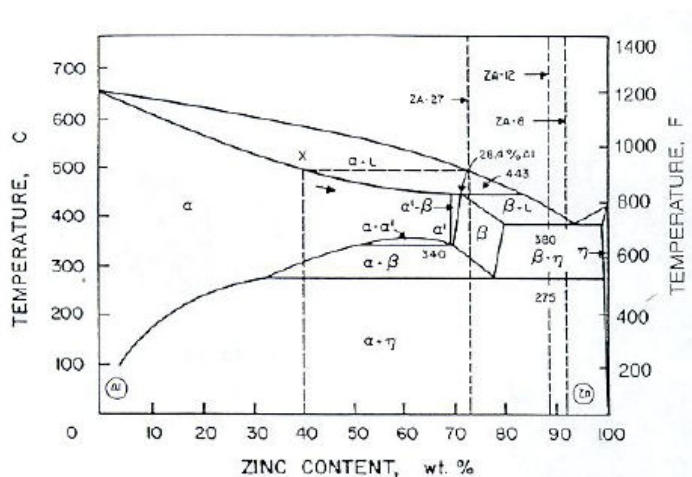
V tomto koncentračním rozmezí jsou nad eutektoidálou dvě fáze  $\alpha_1 + \alpha$ , které mají kubickou plošně centrovanou mřížku s přibližně stejnými mřížkovými parametry, což bylo potvrzeno HANSENEM již v roce 1962, jak uvádí PÍŠEK [25].

Eutektoidní rozpad  $\alpha_1 \rightarrow \alpha + \beta$  má velký význam u slitin litých pod tlakem, kde velká rychlost ochlazování má vliv jednak na eutektoidní přeměnu, a také, a to v mnohem větší míře, na rozpad přesyceného roztoku  $\alpha_1 \rightarrow \alpha + \beta$  po ochlazení. Rozpad

$\alpha_1 \rightarrow \alpha + \beta$  je doprovázen kontrakcí. Podrobněji se o objemových změnách zmiňujeme u slitin pro lití pod tlakem [27].



Obr. 2-3 Rovnovážný binární diagram Al-Zn [25]



Obr. 2-4 Rovnovážný binární diagram Zn-Al [28]

Soustava Zn-Cu je další používaná binární slitina, kde přísada mědi zvyšuje teplotu tání zinku. Po peritektické přeměně při teplotě 424 °C stoupá křivka likvidu prudce vzhůru. Ve struktuře technických slitin Zn-Cu, které obsahují maximálně asi 4 % Cu, jsou vedle sebe roztoky  $\eta + \epsilon$ . Rozpustnost mědi v krystalech se s klesající teplotou zmenšuje a probíhající segregace souvisí s objemovými změnami, podobně jako u slitin Zn-Al. Žíháním při teplotě 80 až 100 °C s následným volným ochlazováním je možno objemové změny zmenšit na minimum.

Přibližně eutektické až mírně nadeutektické složení slitin zinku je pro slévárenské slitiny výhodné. Tuhnutí obvykle začíná vylučováním primární fáze  $\alpha$  (Al). Slitiny zinku dosahují eutektického složení s přibližným obsahem 5 hmot. % hliníku. Čím je

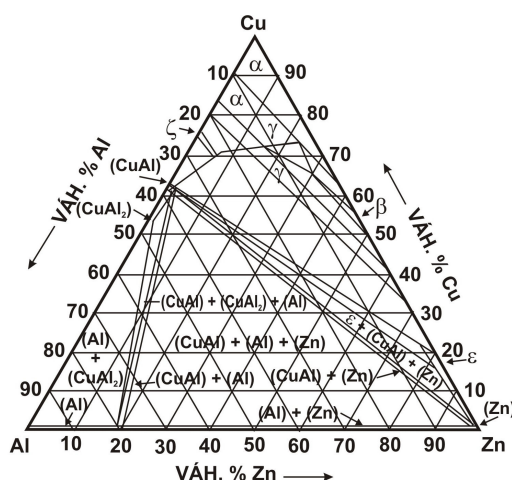
vyšší obsah hliníku tím je vyšší teplota likvidu a také je větší interval teplot, při kterém probíhá tuhnutí.

Nedostatkem binární slitiny zinku je jejich sklon ke stárnutí, což je proces mající za následek objemovou kontrakci odlitků. Projevuje se také u slitin ternárních i vícetložkových. Objemová kontrakce může vyvolat vznik vnitřních pnutí a v jejich důsledku i zrychlení procesu mezikrystalické koroze, při které se objem odlitku naopak zvětšuje a dochází k jeho praskání. Proti těmto jevům působí ve slitinách zinku přísada hořčíku. Hořčík však zhoršuje slévarenské vlastnosti těchto slitin, proto jeho obsahy bývají co možná nejmenší, řádově většinou  $10^{-2}$  hmot. %. Celkem příznivé vlastnosti v binární slitině Zn-Al vykazuje Cu. Na obr. 2-5 je uveden ternární diagram soustavy Zn-Al-Cu. Při teplotě ternárního eutektika 375 °C jsou v rovnováze čtyři fáze:

Kapalná	7 % Al	3,9 % Cu
Tuhý roztok bohatý na Zn	1,3 % Al	2,9 % Cu
Tuhý roztok bohatý na Al		1,8 % Cu
Fáze $\epsilon$ Cu - Zn	1,4 % Al	15,2 % Cu

Při nižších teplotách se fáze bohatá hliníkem rozpadá. Vliv mědi na tento rozpad není znám. Rozpuštěnost mědi a hliníku v tuhém zinku od eutektické teploty klesá na 0,9 % Al a 1,9 % Cu při 274 °C. Ternární slitiny mají, podobně jako slitiny Al-Zn, sklon ke stárnutí. Jeho podstatou je probíhající precipitace a segregace fází vedoucí k objemovým změnám [27].

Třebaže jde o důležitý diagram (obr. 2-5), není zcela prostudován do podrobností.



Obr. 2-5 Ternární rovnovážný diagram soustavy Zn-Al-Cu, [25]

## 2.1 Slévárenské slitiny zinku

Slitiny zinku se zpracovávají odléváním, proto je v technické praxi věnována značná pozornost slévárenským slitinám zinku. Slévárenské slitiny zinku obsahují hlavní přísadový prvek hliník, jehož přítomností se zlepšují jejich pevnostní vlastnosti. Dalšími, resp. vedlejšími přísadovými prvky jsou především měď a hořčík. Zastoupení jednotlivých prvků ve slitinách zinku závisí na použité slévárenské technologii. Slévárenské slitiny zinku lze rozdělit podle použité technologie a obsahu použitých přísadových prvků do tří skupin:

- A) slitiny zinku pro tlakové lití (ZAMAK slitiny),
- B) slitiny zinku pro gravitační lití (ZA slitiny),
- C) slitiny zinku pro méně obvyklé metody lití (speciální slitiny), [29].

Měď podobně jako hliník zmenšuje velikost zrna, zvyšuje mechanické vlastnosti slitin, především pevnost v tahu, tažnost a rázovou houževnatost a zlepšuje zabíhavost slitin. Při obsahu mědi nad 0,7 % se zlepšuje odolnost proti korozi. Ve slitinách bývá obsah mědi v rozmezí od 0,5 do 3 %. Hořčík ve velmi malém množství zvyšuje pevnost v tahu a kompenzuje škodlivý vliv příp. obsahu cínu, olova a kadmia. Obsah hořčíku bývá 0,01 až 0,03 %. Nečistotami ve slitinách zinku jsou zvláště železo, olovo, kadmium a cín. Podporují vznik mezikrystalické koroze a jejich obsah nesmí překročit řádově tisíce procenta. Z tohoto důvodu se při výrobě slitin musí vycházet z velmi čistého zinku (99,995%).

Dezoxidace a odstraňování škodlivých nečistot ze slitin zinku se provádí nejčastěji rafinací taveniny granulemi z plastů, např. z polystyrenu. Polystyren uložený na dno lázně v množství cca 200 g na 1 tunu kovu se rozkládá na uhlovodíky s redukčními vlastnostmi (redukce oxidů, zejména oxidů zinku).

Nepatrná rozpustnost řady prvků v zinku má za následek jejich přednostní výskyt v podobě kovových či nekovových příměsí mezi větvemi dendritů krystalizující slitiny, a to v množství tím větším, čím nižší je rychlost tuhnutí.

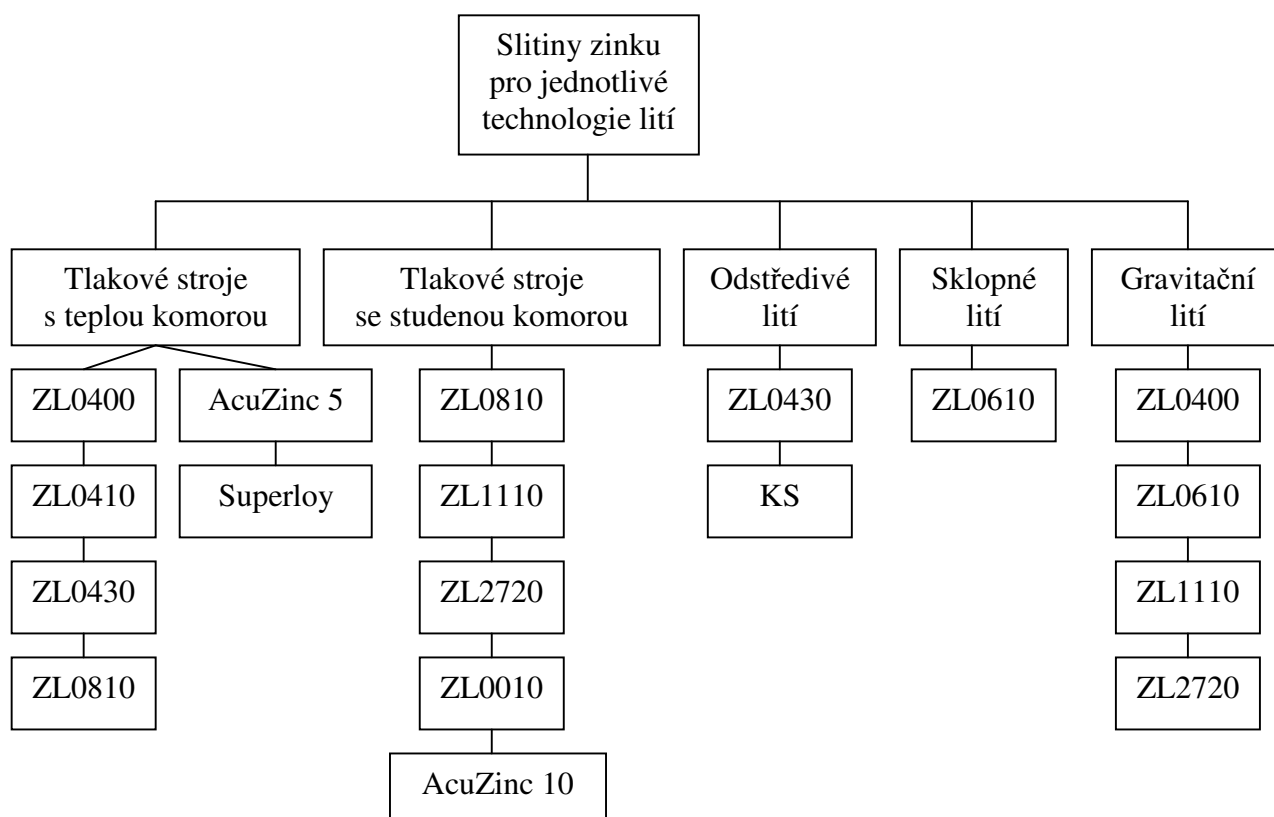
Převážná většina odlitků ze slitin zinku se vyrábí tlakovým litím (to je technologie vyvinutá již před půl stoletím). Starší způsob lití, do pískových a keramických forem, byl rozvinut již v první polovině minulého století. Mezi neobvyklé a méně používané způsoby se řadí lití do sádrových forem, sklopné lití nebo lití do forem ze silikonové



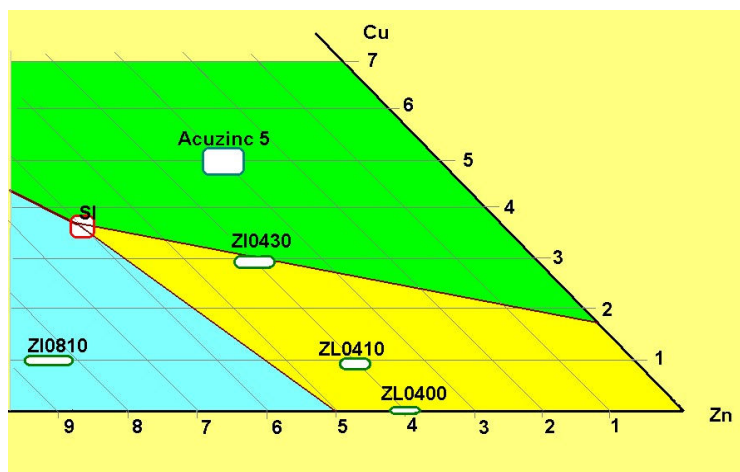
pryže. Používané slitiny vyžadují spolehlivou kontrolu a regulaci obsahu nečistot, tak lze udržet na dobré úrovni vlastností, které jsou závislé na čistotě materiálu (rozměrová stabilita, mezikrystalická koroze, mechanické vlastnosti a obrobiteľnosť). V tabulce 2.5 jsou uvedeny různé možnosti označení daných slévárenských slitin zinku tak, jak je možné je najít nejen v české (dle normy), ale i zahraniční literatuře. Na obr. 2-6 je zobrazeno použití slévárenských slitin zinku pro jednotlivé typy slévárenské technologie. Na obr. 2-7 je část ternárního diagramu soustavy Zn-Al-Cu s vyznačením oblastí odpovídajících jednotlivým slévárenským slitinám zinku, [29].

**Tabulka 2.5 Různé označení používaných slitin zinku [29]**

ČSN 423558	ČSN 423560	ČSN 423562				
Zamak 3	Zamak 5	Zamak 2	ZA 8	ZA 12	ZA 27	Superloy
Zn400	Zn410	Zn430				
ZP3	ZP5	ZP2	ZP8	ZP12	ZP27	Superloy
ZP0400	ZP0410	ZP0430	ZP0810	ZP1110	ZP2720	GDSL
ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3	ZnAl8Cu1	ZnAl11Cu1	ZnAl27Cu2	
ZL0400	ZL0410	ZL0430	ZL0810	ZL01110	ZL02720	
ZL3	ZL5	ZL2	ZL8	ZL12	ZL27	



Obr. 2-6 Schéma rozdělení a použití slévárenských slitin zinku pro jednotlivé slévárenské technologie [29]



Obr. 2-7 Část ternárního diagramu Zn-Al-Cu s vyznačením používaných slévarenských slitin zinku [29]

Slitiny zinku mají i nevýhody mezi něž se řadí poměrně vysoká hustota, která je více než 2,4 násobně vyšší než např. u slitin hliníku. Ze slitin zinku se vyrábí převážně drobné odlitky, proto vyšší hmotnost zinku není na překážku. Pro informaci jsou v příloze č. 5 uvedeny hodnoty důležitých vlastností slitin zinku a hliníku. V této příloze je také porovnání vlastností slitin zinku s dalšími materiály (slitiny hliníku, hořčíku, mosaz, ocel a plastické hmoty), [29].

### 2.1.1 Slitiny zinku pro tlakové lití

Základem těchto slitin, jak bylo uvedeno, je binární soustava Al-Zn, která obsahuje 3,8 až 4,0 hmot. % hliníku, tedy slitina v blízkosti eutektického bodu, viz obr. 2-3. Do této skupiny slitin patří slitiny zinku zařazené v ČSN:

- ZnAl4 (Zamak 3/ZL3/ZL0400//Zn400) - ČSN 42 3558,
- ZnAl4Cu1 (Zamak 5/ZL5/ZL0410/Zn410) - ČSN 42 3560,
- ZnAl4Cu3 (Zamak 2/ZL2/ZL0430/Zn430) - ČSN 42 3562, [13], [29].

Tyto slitiny se dělí na slitiny pro tlakové lití ingotů a slitiny pro tlakové lití odlitků. Zde a u slitin podeutektického složení je též příznivý interval tuhnutí (představuje jen několik °C). Dalšími přísadovými prvky v malém množství jsou měď a hořčík. Tyto slitiny vykazují výborné slévarenské vlastnosti, vynikající fyzikální a mechanické vlastnosti a dlouhodobou rozměrovou stálost. Dříve se pro tlakové lití používaly slitiny s obsahem 4 % Al, které se podle obsahu Al, Cu a Mg označovaly



Z400, Z410 a Z430. V současné době jsou slitiny zinku známy pod zahraničním označením ZAMAK (podle německého názvu základních prvků - **Z**ink, **A**luminium, **M**agnesium, **K**upfer), mají stejný obsah hliníku (3,5 až 4,3 hmot. %), ale rozdílné obsahy mědi, hořčíku a příměsových prvků Fe, Pb, Cd a Sn. V tabulce 2.6 jsou uvedeny slitiny zinku pro tlakové lití normované dle ASTM a ČSN, [13].

**Tabulka 2.6 Chemické složení slitin zinku pro tlakové lití dle ASTM a ČSN [13]**

Chemické složení slitin zinku [hmot. %]									
Označení	Cu	Al	Mg	Fe max.	Pb max.	Cd max.	Sn max.	Ni	Zn
Tlakově lité ingoty (ASTM B240)									
Alloy 3	0,10 max.	3,9 - 4,3	0,02 - 0,05	0,075	0,004	0,003	0,002		zbytek
Alloy 5	0,75 - 1,25	3,9 - 4,3	0,03 - 0,06	0,075	0,004	0,003	0,002		zbytek
Alloy 7	0,10 max	3,9 - 4,3	0,01 - 0,02	0,075	0,0020	0,0020	0,001	0,005 - 0,020	zbytek
Tlakově lité odlitky (ASTM B86)									
Alloy 3	0,25 max.	3,5 - 4,3	0,02 - 0,05	0,100	0,005	0,004	0,003		zbytek
Alloy 5	0,75 - 1,25	3,5 - 4,3	0,03 - 0,08	0,100	0,005	0,004	0,003		zbytek
Tlakově lité odlitky (ČSN)									
ČSN	Al	Cu	Mg	Fe max.	Pb + Cd max.	Sn max.	R <sub>m</sub> [Mpa]	A <sub>10</sub> [%]	HB
ZnAl4 42 3558	3,9 - 4,3	0,10	0,02 - 0,05	0,075	0,009	0,001	160 - 180	1	60
ZnAl4Cu1 42 3560	3,9 - 4,3	0,75 - 1,25	0,02 - 0,05	0,075	0,009	0,001	270 - 330 <sup>1)</sup> 180 - 220 <sup>2)</sup>	2 - 5 <sup>1)</sup> 1,5 <sup>2)</sup>	80 - 100 <sup>1)</sup> 70 <sup>2)</sup>
ZnAl4Cu3 42 3562	3,5 - 4,3	2,4 - 3,2	0,03 - 0,06	0,075	0,009	0,001	420 - 480 <sup>1)</sup> 300 <sup>2)</sup>	2 - 3 <sup>1)</sup> 2 <sup>2)</sup>	80 - 120 <sup>1)</sup> 90 <sup>2)</sup>
Mechanické vlastnosti: <sup>1)</sup> pro odlitky lité pod tlakem <sup>2)</sup> pro odlitky lité do kokily									

Slitiny zinku pro tlakové lití nejsou určeny pro součásti vystavené zvýšeným teplotám. Jejich tečení při zatížení mechanickou silou se výrazně projevuje už za teplot nad 75 °C. Při teplotě 110 °C se jejich pevnost v tahu snižuje o 30 % a tvrdost o 40 %. Za teplot pod bodem mrazu dochází k jejich křehnutí. Slitiny zinku s vyšší odolností



proti tečení obsahují Cr (0,1 až 0,2 %) a titanu (0,15 až 0,25 %) a obsah hliníku je v nich snížen, [13].

**Tabulka 2.7 Hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností slitin zinku dle ČSN [13]**

Vlastnost	ČSN 42 3558 ZnAl4	ČSN 42 3560 ZnAl4Cu1	ČSN 42 3562 ZnAl4Cu3
Hustota [ $\text{kg.m}^{-3}$ ] při teplotě 20 °C	6600	6700	6800
Interval teplot tuhnutí [°C]	386 až 380	386 až 380	390 až 379
Maximální teplota přehřátí při odlévání [°C]	440	450	440
Smrštění při tuhnutí od teploty 470 do 20 °C [%]	1,17	1,17	1,17
Střední izobar. součinitel délkové roztažnosti (20 - 100 °C) [ $\text{K}^{-1}$ ]	$27,4 \cdot 10^{-6}$	$27,4 \cdot 10^{-6}$	$27,4 \cdot 10^{-6}$
Střední hodnota měrné tepelné kapacity (20 až 100 °C) [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]	400	400	400
Měrná elektrická vodivost při 20 °C [ $\text{S.m}^{-1}$ ]	15 až 16	15	14,5 až 15
Teplotní koeficient el. odporu (0 - 100 °C)	0,038	0,0035	0,0033
Nejnižší mez kluzu $R_{p0,2}$ v tahu [MPa]	200 až 230	220 až 250	170 až 200 <sup>1)</sup> 200 až 230 <sup>2)</sup>
Nejnižší pevnost v tahu [MPa]	245	275	215 <sup>1)</sup> 235 <sup>2)</sup>
Nejnižší tažnost $A_5$ [%]	3 až 6	2 až 5	0,5 až 2 <sup>1)</sup> 1 až 3 <sup>2)</sup>
Tvrдость podle Brinella (minimální)	70	85	100
Modul pružnosti v tahu [MPa]	127 500	127 500	127 500
Pevnost v tlaku [MPa]	412	598	-
Pevnost v střihu [MPa]	216	275	-
Mez únavy při $10^8$ cyklů [MPa]	49	54	-
1) pro odlitky lité do pískových forem 2) pro odlitky lité do kovové formy gravitačně			

Tyto slitiny jsou také využívány na pokovování, konečné úpravy a strojové obrábění. Jejich vynikající povrchové charakteristiky umožňují jejich použití pro dekorativní aplikace. Odlitky lité pod tlakem mají dobré univerzální mechanické vlastnosti a mohou být odlévány ve velmi tenkých částech a s velmi přesnou rozměrovou tolerancí. Hlavní oblasti použití hotových výrobků ze slitin zinku litých pod tlakem jsou automobilový průmysl, stavebnictví, elektrické příslušenství a elektronika. Typické tolerance zinkových odlitků litých pod tlakem jsou 1/1000





z hlavního rozměru (nebo  $\pm 0,0015$  mm/mm pro první mm s přídavkem  $\pm 0,002$  mm/mm na delší části), [29].

### 2.1.2 Slitiny zinku pro gravitační lití

Slitiny zinku pro gravitační lití mají vyšší obsah hliníku než slitiny používané pro tlakové lití. Obsah hliníku je vyšší než 8 % - odtud také název ZA slitiny. Do této skupiny se řadí slitiny:

- ZA8 (ZL8/ZL0810/ZnAl8Cu1/ZA-8)
- ZA12 (ZL12/ZL01110/ZnAl12Cu1/ZA-12)
- ZA27 (ZL27/ZL02720/ZnAl27Cu2/ZA-27), [29].

Na rozdíl od slitin zinku pro tlakové lití, které jsou podeutektického složení, mají slitiny používané pro gravitační lití (do pískových a do trvalých forem) nadeutektickou koncentraci zinku (8 až 27 hmot. %), viz tabulka 2.8. Tyto slitiny mají výborné slévárenské vlastnosti, při jejich tavení a odlévání není třeba krycí struska, ani odplynění. ZA12 a ZA27 mohou být odlévány také tlakovým litím, avšak pouze do studené komory a to proto, že hliník má vysokou reaktivitu se železem a je zde také vysoký bod tání. ZA8 je možné odlévat na strojích s teplou komorou. ZA slitiny mají vynikající mechanické vlastnosti, viz tabulka 2.9. ZA odlitky jsou konkurencí pro litinu, bronz a hliník, protože mají všestranné vlastnosti a zpracovatelské výhody. Z těchto tří slitin je ZA12 nejvíce využívána. Nicméně, ZA27 nabízí vysoké mechanické vlastnosti bez ohledu na metodu lití. ZA8 má dobré pokovovací vlastnosti, [13].

**Tabulka 2.8 Chemické složení slitin zinku pro gravitační lití [13]**

Chemické složení [hmot. %]								
Označení	Cu	Al	Mg	Fe max.	Pb max.	Cd max.	Sn max.	Zn
ASTM B669								
ZnAl 8	0,80 - 1,30	8,00 - 8,80	0,015 - 0,030	0,10	0,004	0,003	0,002	Zbytek
ZnAl 12	0,50 - 1,25	10,5 - 11,5	0,015 - 0,030	0,75	0,004	0,003	0,002	Zbytek
ZnAl 27	2,00 - 2,50	25,0 - 28,0	0,010 - 0,020	0,10	0,004	0,003	0,002	Zbytek

**Tabulka 2.9 Přehled hodnot mechanických vlastností nadeutektických slitin zinku [13]**

		<b>R<sub>m</sub></b> [MPa]	<b>R<sub>p0,2</sub></b> [MPa]	<b>A<sub>5</sub></b> [%]	<b>HB</b>	<b>E</b> [MPa]	<b>Hustota</b> [kg.m <sup>-3</sup> ]	<b>Teplota tavení</b> [°C]
<b>ZnAl8</b>	Písek	248-275	193-200	1-2	85-90	85000	6300	375-404
	Kokila	220-255	190-200	1-2	85-90			
	Tlak. Lití	360-385	280-300	5-10	95-105			
<b>ZnAl1 2</b>	Písek	275-310	206-213	1-3	105-125	82500	6000	375-432
	Kokila	310-345	213-220	2-5	105-125			
	Tlak. Lití	390-415	310-330	4-7	95-105			
<b>ZnAl2 7</b>	Písek	400-440	338-345	3-6	110-120	75000	5000	375-487
	Kokila	310-325	255	8-11	90-100			
	Tlak. Lití	405-440	360-380	1-2	110-120			

### 2.1.3 Slitiny zinku pro ostatní způsoby lití

Slitiny zinku pro ostatní způsoby lití (odstředivé, sklopné, přesné lití) obvykle obsahují 4,75 až 5,5 hmot. % hliníku a malé množství mědi a křemíku. Jsou vhodné pro malé, tvarově složité odlitky s menšími nároky na pevnostní vlastnosti. Mají rozměrovou stálost a lze je odlévat méně běžnými způsoby. Do této skupiny slitin zinku patří:

- Superloy, ZL0610, ZL0210, ZL0360, BERIC, Main Metal, Alzen P, Alzen S, ACuZinc 5, ACuZinc 10, Kirksite, KAYEM, KS, [29].

Slitina *Superloy* byla vytvořena pro tlakové lití do teplé komory a obsahuje 7 % Al a 3,8 % Cu. Tato slitina má vynikající slévárenské (vysokou tekutost a dobré zaplňování dutiny formy vhodné pro tenkostěnné odlitky) a mechanické vlastnosti.

*ZL0610* je slitina obsahující 6 % Al a 1 % Cu a malé množství dalších příměsí. Tato slitina je používána zejména pro sklopné lití, kde se využívá ne zcela solidifikačního stavu taveniny.

*ZL0210* obsahuje 2 % Al a 1 % Cu. Tato slitina je používána zejména pro dekorální části, hračky a ostatní odlitky, které nevyžadují vynikající mechanické vlastnosti.

*BERIC* je slitina vyvinuta japonskou společností Nisso Smelting Co. Je odvozena od ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>1</sub>, avšak tato slitina má vyšší obsah mědi (3 - 4 %) a dále malé množství

titanu (0,01 %) a berylia (0,04 %). Nicméně berylium je pro některé své škodlivé vlastnosti zakázáno v zemích EU, proto tato slitina není v Evropě známa a používána.

Odlitky ze slitiny *Acuzinc 5* jsou odlévány technologií lití pod tlakem do horké komory. Tyto odlitky se vyznačují vynikajícími vlastnostmi jako je pevnost, tvrdost a deformační vlastnosti. V důsledku možnosti odměšování některých složek slitiny je nutné během lití taveninu promíchávat. Teplota lití je u této slitiny okolo 500 °C. Slitina *Acuzinc 10* je využívána pro lití pod tlakem do studené komory. Má stejné vlastnosti jako slitina *Acuzinc 5*.

*Kirkiste* slitina je vlastně jeden z obchodních názvů pro Zamak 2. Je to mírně pevnostní slitina Zn-Al, která je často využívána na výrobu tvářecích nástrojů a forem (zvláště pro vstřikování plastů). Odlitky z této slitiny umožňují snížení nákladů na obrábění, protože slitina umožňuje přesné lití a vyžaduje minimální dokončovací práce. Tato slitina může být také využívána jako univerzální slitina pro nenamáhané součásti. Její vysoká tepelná vodivost umožňuje rychlé ochlazení cyklů. Možnost využití této slitiny je zejména v oblasti gumárenském a keramickém průmyslu, dále pak na lisovací nástroje, vysekávací nože a razidla pro lisování plechů.

*KAYEM* slitina může být použita pro gravitační lití i lití pod tlakem do horké komory. Hlavní využití je zejména v gravitačním lití lisovacích a formovacích nástrojů. Při tlakovém lití, kdy je vyvíjena značná síla a tlak je u této slitiny využívána její vynikající tekutost. Nicméně, rozměrová stálost a stálé mechanické vlastnosti nejsou postupem času a díky vyšším teplotám tak dobré jako u slitin Zamak 3 a ZA8.

*KS* je ve skutečnosti slitina Zamak 2 avšak má vyšší obsah hořčíku a je vhodná zejména pro dekorativní součásti, [29].

## 2.2 Slévárenské a fyzikální vlastnosti

Slitiny zinku se vyznačují dobrými slévárenskými vlastnostmi. Především slitiny zinku ZnAl8 a ZnAl12 vykazují úzké pásmo teplot tuhnutí, čímž nedochází ke vzniku mikrostaženin a pórovitosti. Tyto odlitky dosahují vynikající těsnost. V současné době se začínají čím dále více uplatňovat při tlakovém lití. Slitina ZnAl27 má již poměrně široký interval teplot při tuhnutí, proto má větší sklon ke vzniku pórovitosti.

Chování tavenin slitin zinku ve slévárenských formách je možno hodnotit na základě jejich fyzikálně-chemických vlastností. Procesy ve slévárenských formách jsou výsledkem vzájemných interakcí různých vlastností slitin a formy. Z tohoto



důvodu se hodnotí důležité vlastnosti slitin slévárenských materiálů. K těmto vlastnostem se řadí zabíhavost, objemové a lineární smrštění, náchylnost na tvorbu trhlin a prasklin. Tyto slévárenské vlastnosti, jejichž sledování bylo provedeno v rámci kapitoly 5, ovlivňují do jisté míry i fyzikální vlastnosti odlévaných slitin, ke kterým se řadí:

Dynamická viskozita,  $\eta$  [Pa .s] - má vliv na tekutost tavenin. S rostoucí teplotou viskozita klesá a ohřátá slitina lépe vyplňuje slévárenskou formu. V tabulce 2.10 jsou uvedeny hodnoty dynamické viskozity čistých kovů při teplotě o 10 až 20 °C nad teplotou tavení ve srovnání s vodou podle KURĐUMOVA [30]. Vliv viskozity na zabíhavost se stává vzájemný tehdy, jak se tavenina ochladí na kritickou teplotu nulové zabíhavosti, [31].

**Tabulka 2.10 Hodnoty viskozity vybraných kovů při teplotách 10 až 20 °C nad teplotu tavení a vody při teplotách 0 °C a 100 °C podle KURĐUMOVA [30]**

Kov						
Zinek	Hliník	Měď	Hořčík	Cín	Nikl	Voda
Hodnota dynamické viskozity $\eta$ [MPa.s]						
3,2	1,2	3,5	1,3	1,7	4,5	1,8 při 0 °C 0,3 při 100 °C

Povrchové napětí taveniny,  $\sigma$  [N .m<sup>-1</sup>] - má také vliv na zabíhavost slévárenských slitin. Jak je známo, povrchové napětí je definováno jako síla působící na délkovou jednotku povrchu v jeho rovině. Povrchu taveniny je přisuzována určitá zásoba energie, která souvisí s větší energií částice (molekuly) v povrchové vrstvě proti částicím v objemu taveniny. Hodnoty povrchového napětí vybraných kovů jsou uvedeny v tabulce 2.11.

**Tabulka 2.11 Hodnoty povrchového napětí vybraných kovů používaných ve slévárenství [31]**

Kov	Teplota tání kovu [°C]	Hodnota povrchového napětí $\sigma$ [N.m <sup>-1</sup> ]
<b>Zinek</b>	420	0,76
<b>Hliník</b>	660	0,85
<b>Měď</b>	1083	1,25
<b>Hořčík</b>	650	0,55
<b>Cín</b>	232	0,55
<b>Nikl</b>	1455	1,80



Objemové změny při tuhnutí - se projevují vznikem soustředěné staženiny a rozptýlenou pórovitostí odlitku. To souvisí s podmínkami tuhnutí, resp. s intervalem teplot tuhnutí. Naopak, některé kovy při tavení zmenšují svůj objem (tyto kovy mají záporné hodnoty), jak je uvedeno v tabulce 2.12. Hodnoty objemových změn některých slévárenských slitin jsou v tabulce 2.13. Tato vlastnost je při tuhnutí odlitků nepříznivá. Objemové změny souvisí nejen s chemickým složením a lící teplotou, ale také se způsobem chlazení. Nejúčinnějším prostředkem proti stahování tlakově litých slitin zinku (ZnAlCu) je co nejnižší lící teplota, tj. 410 až 425 °C, [29].

**Tabulka 2.12 Změna specifického objemu (V) kovu při tavení [31]**

Kov	Atomová hmotnost	Teplota tání [°C]	Změna specifického objemu při tavení [%]
Zinek	65	420	4,1
Hliník	27	660	5,1
Měď	64	1083	5,3
Hořčík	24	650	4,2
Cín	119	232	3,5
Nikl	59	1455	3,1
Železo	56	1539	3,2
Křemík	28	1430	-5,0
Gálium	70	29	-3,2
Bismut	209	271	-3,3
Antimon	122	630	-1,0
Germánium	73	936	-5,0

**Tabulka 2.13 Hodnoty objemového smršťování slévárenských slitin [31]**

Slitiny kovů	Smrštění tekuté fáze při ochlazení o 100 °C $\epsilon_{VL}$ [%]	Stahování $\epsilon_{VK}$ [%]	Součinitel stahování $\beta$ [%]
Slitiny zinku	1,39	4 až 6	-
Slitiny hliníku	1,2 až 1,3	3 až 6	3 až 6
Slitiny mědi	1,9	3 až 5	3 až 7
Slitiny hořčíku	7,0	4	neuváděn
Ocel uhlíková	0,4 až 1,6	2 až 6	3 až 10
LLG	1,1	-2 až 3	1 až 4
LKG		-2 až 1	0 až 13

Objemové změny při tuhnutí odlitků se nejčastěji zjišťují experimentálně.



Lineární smrštění při chladnutí odlitků - úzce souvisí s rozměry modelů pro výrobu slévárenských forem. Toto smrštění je závislé na odlévané slitině, typu slévárenské formy i způsobu odlévání. Hodnoty lineárního smrštění vybraných kovů jsou patrné z tabulky 2.14.

**Tabulka 2.14** Hodnoty lineární smrštění slévárenských slitin při různých způsobech odlévání podle VALECKÉHO [32], ČABELKY [33] a ELBELA [34]

Slitiny kovů	Hodnoty lineárního smrštění [%]		
	Písková forma	Kovová forma (gravitační lití)	Tlakové lití
<b>Slitiny zinku</b>	1,1 <sup>*)</sup> 0,8 až 1,6 <sup>**)</sup>	1,6 <sup>*)</sup> 0,6 až 1,0 <sup>**)</sup>	0,6
<b>Slitiny hliníku</b>	0,9 až 1,4 <sup>*)</sup>	1,5 <sup>*)</sup>	0,5
<b>AlSi12</b>	1 až 1,14	0,5 až 0,8	0,4 až 0,6
<b>AlSi6Cu3</b>	1 až 1,2 0,9 až 1,3 <sup>**)</sup>	0,8 až 1,0 0,6 až 1,0 <sup>**)</sup>	0,5 až 0,8 0,5 až 0,7 <sup>**)</sup>
<b>AlMg8</b>	1,1 až 1,6 1,0 až 1,4 <sup>**)</sup>	0,9 až 1,3 0,8 až 1,2 <sup>**)</sup>	0,5 až 0,7 0,6 až 0,9 <sup>**)</sup>
<b>Slitiny mědi (Cu-Al)</b>	1,2 až 1,9 <sup>*)</sup> 1,8 až 2,4 <sup>**)</sup>	1,4 až 2,3 <sup>*)</sup> 1,6 až 2,2 <sup>**)</sup>	0,7
<b>Slitiny hořčíku</b>	1,1 <sup>*)</sup> 0,8 až 1,6 <sup>**)</sup>	1,4 <sup>*)</sup> 0,8 až 1,6 <sup>**)</sup>	0,7 0,6 až 1,0 <sup>**)</sup>

**Poznámka:** hodnoty uvedené <sup>\*)</sup> jsou podle PÍŠKA, hodnoty uvedené <sup>\*\*)</sup> jsou podle ELBELA

Slitiny zinku se odlévají nejčastěji při vysokotlakém lití, hodnoty lineárního smrštění jsou poměrně malé cca 0,6 % původní délky.

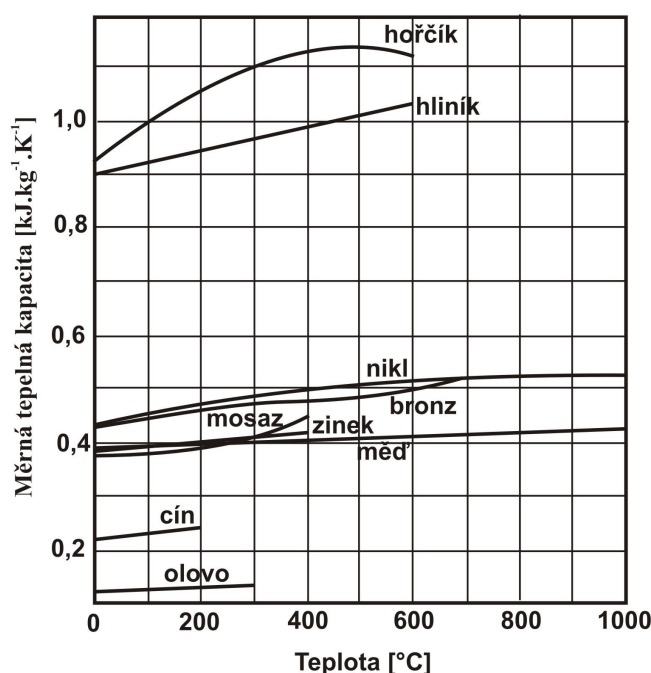
Obecně jsou slévárenské vlastnosti slitin zinku charakterizovány jako velmi dobré, obzvláště ty slitiny, které vykazují úzké pásmo tuhnutí, nevykazují vznik mikrostaženin a pórovitost, čímž mají dobrou těsnost (ZnAl8 a ZnAl12). Také se vyznačují dobrou zabíhavostí. Při tlakovém lití lze odlévat drobné odlitky o tloušťce cca 0,3 mm a předlévat otvory od  $\varnothing$  1 mm. Vlivem použití nízké teploty lití (cca 450 až 620 °C) a při vysokotlakém lití lze dosáhnout přesnost odlitku od  $\pm$  0,03 mm. U odlitků větších rozměrů lze docílit přesnost cca  $\pm$  0,2 mm.

## 2.3 Tepelně-fyzikální vlastnosti

Tepelné vlastnosti zinku jsou důležité veličiny pro řešení tepelných dějů mezi odlitkem a formou. Mezi tepelné vlastnosti zinku se řadí měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost, teplotní vodivost, latentní krystalizační teplo. Je důležité mít na zřeteli, že tyto veličiny jsou funkcí teploty. Zjistit jejich teplotní závislosti pro jednotlivé slitiny zinku je dosti náročné. Teplotní závislosti těchto veličin jsou nejčastěji publikovány pro čistý zinek.

### Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita  $c$  je definována jako tepelná kapacita hmotné jednotky (podíl tepelné kapacity objektu a jeho hmotnosti), přičemž měrná tepelná kapacita značí množství tepla potřebné pro ohřátí 1 kg látky o 1 °C. Na obr. 2-8 je zobrazena závislost měrné tepelné kapacity na teplotě pro neželezné kovy a slitiny.



Obr. 2-8 Měrná tepelná kapacita neželezných kovů a slitin [31]

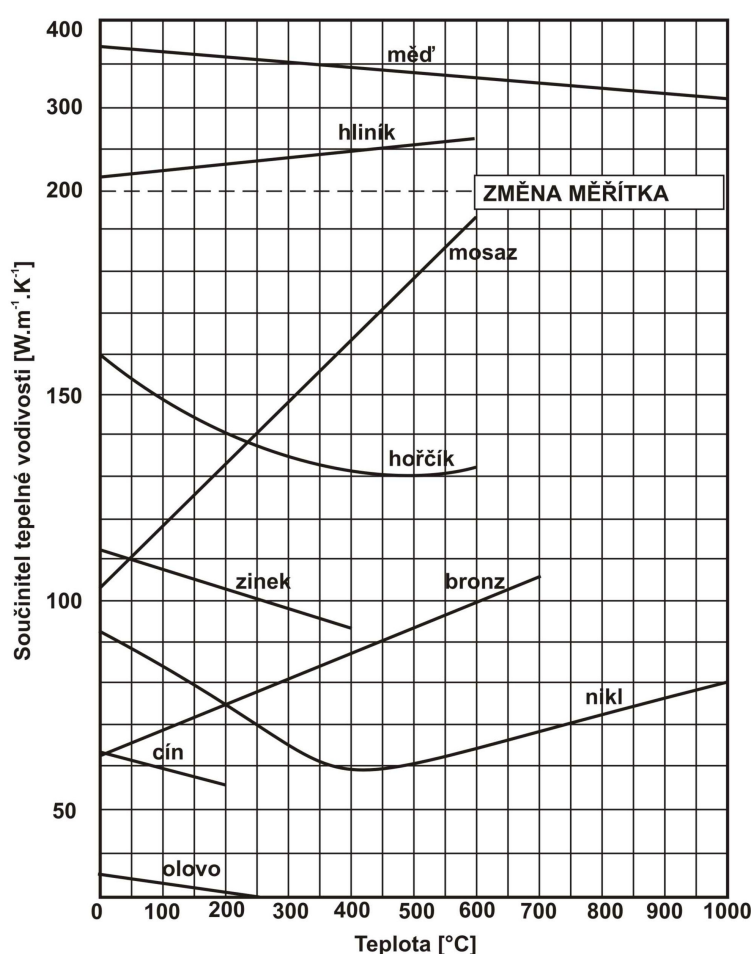
### Teplotní vodivost

Součinitel teplotní vodivosti ( $\alpha$ ) vyjadřuje schopnost látky vyrovnávat rozdílné teploty při neustálém šíření tepla vedením v homogenním prostředí, je rovna podílu tepelné konduktivity a součinu její objemové hmotnostní a měrné tepelné kapacity při stálém

tlaku. Lze ji stanovit výpočtem z hodnot výše uvedených veličin, je též závislá na teplotě a proto její výpočet souvisí s hodnotami veličin, podle [31], které odpovídají dané teplotě.

### Tepelná vodivost

Součinitel tepelné vodivosti ( $\lambda$ ) vyjadřuje schopnost dané látky vést teplo. Číselně vyjadřuje množství tepla, které v ustáleném stavu prochází jednotkovým průřezem látky, při jednotkovém teplotním gradientu za jednotku času. Obr. 2-9 zobrazuje závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě pro neželezné kovy a slitiny.



Obr. 2-9 Teplená vodivost neželezných kovů a slitin [31]

### Hustota

Hustota kovů je definována podílem hmotnosti a objemu homogenního kovu při určité teplotě. Teoretická měrná hmotnost je určena atomovou stavbou, proto je závislá na poloze kovu v periodické tabulce. Ve skutečnosti však nejen mřížkové





poruchy, ale zejména póry, dutiny a vměstky ovlivňují praktickou hodnotu měrné hmotnosti kovů. Měrná hmotnost kovů se pohybuje v širokých mezích a často se podle ní kovy třídí na lehké a těžké. Následkem pórů mívají např. lité kovy měrnou hmotnost až o 3 % menší než kovy tvářené. V tabulce 2.15 jsou uvedené hodnoty hustoty a teploty tání vybraných kovů a slitin.

**Tabulka 2.15 Hustota a teplota tání neželezných kovů a slitin, [29], [31]**

Kov	Hustota [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]	Teplota tání [ $^{\circ}\text{C}$ ]
<b>Zinek</b>	7130	420 (419)
<b>Hliník</b>	2720	660
<b>Mosaz</b>	8400 až 8800	900
<b>Hořčík</b>	1740	650
<b>Měď</b>	8960	1083
<b>Bronz</b>	7500 až 8900	900
<b>Nikl</b>	8900	1450
<b>Cín</b>	7298	232
<b>Olovo</b>	11 340	327

#### **Měrné skupenské teplo tavení látek**

Měrné skupenské teplo tání je teplo, které přijme 1 kilogram pevné látky, jestliže se za teploty tání celý přemění na kapalinu téže teploty. V tabulce 2.16 jsou uvedeny hodnoty měrného skupenského tepla tání neželezných kovů a slitin.

**Tabulka 2.16 Měrné skupenské teplo tání neželezných kovů a slitin [31]**

Kov	Měrné skupenské teplo tání [ $\text{J.kg}^{-1}$ ]
<b>Zinek</b>	113 000
<b>Hliník</b>	394 000
<b>Mosaz</b>	184 00
<b>Hořčík</b>	197 000
<b>Měď</b>	209 000
<b>Nikl</b>	264 000
<b>Cín</b>	58 600
<b>Olovo</b>	25 100

### 3. CHARAKTERISTIKA VÝROBY ODLITKŮ ZE SLITIN ZINKU

Čistý zinek a slitiny zinku je možné odlévat všemi běžnými způsoby, avšak nejvíce je využívána metoda tlakového lití na strojích s teplou komorou. Dále se používá také tlakové lití na strojích se studenou komorou, gravitační lití, odstředivé lití a sklopné lití.

Při tlakovém lití slitin s obsahem 8 až 12 % Al lze použít stroje se studenou tlakovou komorou. Pro lití slitiny ZnAl27 je nutno výhradně používat stroje se studenou tlakovou komorou (aby nedocházelo ke kontaminaci železa z formy do odlitku). Povrch tlakových forem se opatřuje ochrannými nástřiky nebo nátěry. Při dostatečném odvodu tepla z odlitku není třeba intenzivní mazání formy, neboť slitiny zinku se nelepí na líc formy a používané mazání formy se provádí spíše za účelem ochranného účinku líce formy.

#### 3.1 Tlakové lití

Technologie tlakového lití slitin zinku se uplatňuje při výrobě tvarově složitých odlitků s hladkým povrchem a velmi přesnými rozměry. Odlitky ze slitin zinku do hmotnosti cca 900 g, viz obr. 3-1, jsou nejčastěji odlévány na strojích s teplou vertikální tlakovou komorou (např. tlakové stroje fy. FRECH - viz obr. 3-2) s uzavírací silou 20 000 až 63 000 [N]. Tavenina slitiny zinku o teplotě 410 až 420 °C je vstřikována do dutiny kovové formy o rychlosti až 50 m.s<sup>-1</sup>, s dotlakem cca 10 až 30 MPa, [35].

V příloze č. 6 je uvedeno porovnání tlakového lití s ostatními výrobními metodami. V této příloze jsou také uvedeny výhody tlakového lití slitin zinku.



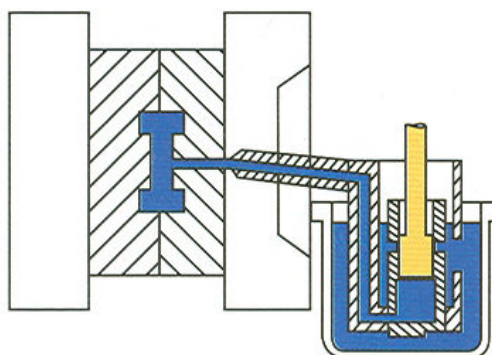
Obr. 3-1 Odlitky ze slitin zinku lité pod tlakem na stroji fy. FRENCH (vyrábí fa. Tenza Adamov) [36]



Obr. 3-2 Tlakový stroj firmy FRECH, [35]

### Tlakové lití na stroji s teplou komorou

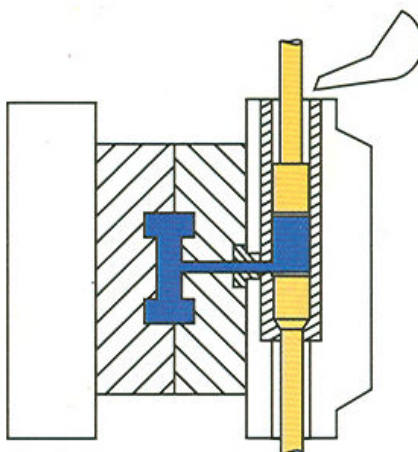
Stroje pro tlakové lití do horké komory jsou využívány zejména pro zinek, měď, hořčík, olovo a další slitiny s nízkým bodem tání, které ihned nezpůsobují korozi a poškození dutiny formy, válců a pístů. Vstřikovací mechanismus strojů s horkou komorou je ponořený do lázně roztaveného kovu v zásobníku kovu. Pec je spojena s mechanismem pro vstřikování roztaveného kovu. Když píst vstřikovacího válce jde nahoru, kanál ve vstřikovacím válci se otevírá a roztavený kov vyplňuje komoru ve vstřikovacím válci. Když jde píst vstřikovacího válce dolů, uzavírá se komora ve vstřikovacím válci a silou je roztavený kov vtlačen přes vstřikovací kanál a trysku do dutiny formy. Kov ztuhne v dutině formy, píst se zvedá, stroj se otevírá a odlitek je pomocí vyhazovačů vyjmut z dutiny formy. Na obr. 3-3 je schéma principu odlévání s použitím stroje s horkou komorou, [35].



Obr. 3-3 Schéma principu odlévání s použitím stroje s horkou komorou [35]

### Tlakové lití na stroji se studenou komorou

Stroje pro tlakové lití se studenou komorou jsou využívány pro slitiny s hliníkem, které mají vyšší bod tání, dále pak pro slitiny zinku s vyšším obsahem hliníku (ZA27). Roztavený kov je vlit do studené komory ruční nebo automatickou pávní. Hydraulicky ovládaný píst uzavírá komoru a vysokým tlakem je kov vtlačen do dutiny formy. Na obr. 3-3 je zobrazeno schéma principu odlévání s použitím stroje se studenou komorou, [35].



Obr. 3-4 Schéma principu odlévání s použitím stroje se studenou komorou [35]

Tlakovým litím slitin zinku se v České republice se v současné době zabývá jen několik firem: firma Beneš&Lát - Průhonice (pobočka Slaná u Semil); Ortmann s.r.o. - Děčín; TENZA Slévárna Adamov; MOTOR JIKOV Tlaková slévárna a.s.; GRÄTHER-Tlakové lití, s.r.o. Bosňany; KOVAP v.d. Náchod. V zahraničí je nejrozšířenější firma Dynacast, která má své výrobní prostory v USA, Kanadě, Německu, Francii, Rakousku a v dalších zemích.

## 3.2 Gravitační lití

Gravitační lití je nejstarší způsob výroby odlitků. Při této výrobě se odlévá do různých typů slévarenských forem. Nejčastěji se jedná o gravitační lití do trvalých (kovových) forem a do pískových forem. Trvalé (kovové) formy je možné použít pro několik odlití, avšak písková forma musí být vždy nově zhotovena pro každý jednotlivý odlitek. Ukázka odlitků ze slitin zinku litých gravitačně je na obr. 3-5.



Obr. 3-5 Typy odlitků ze slitin zinku (výroba USA) [37]

### **Gravitační lití do trvalých (kovových) forem**

Gravitační lití do trvalých (kovových) forem, viz obr. 3-6, využívá forem vyrobených z litiny s lupínkovým grafitem nebo z oceli ČSN 19 552. Značnou výhodou trvalých forem je velmi kvalitní, málo drsný povrch odlitků, který vyžaduje jen minimální náklady na dokončovací práce. V tomto procesu je možné vyrobit odlitky s minimální tloušťkou stěny 3-5 mm. Trvalé formy bývají přehřívány na teplotu až 200 °C. Dutina trvalé formy neumožňuje velké smrštění a dilatace odlitku během tuhnutí, protože zahřátá trvalá forma se rozpíná již během lití. V tomto procesu se musí líc formy nástřikem nebo nátěrem za použití temperančního systému.

Výroba odlitků gravitačním litím do trvalých forem je vhodná zejména pro velkosériovou výrobu odlitků. Při vyšším počtu odlití se snižuje vlastní cena odlitku. Nejčastěji jsou odlévány odlitky o hmotnosti od 50 g do 20 kg. Typickým výrobním sortimentem bývají drobné součásti pro automobilový průmysl, [29].



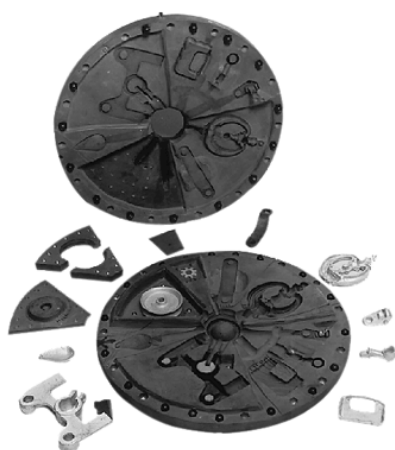
Obr. 3-6 Gravitační lití slitiny zinku do trvalé formy [29]

## Gravitační lití do pískových forem

Lití do pískové formy je nejjednodušší výroba odlitků z neželezných kovů. Tento proces je vhodný pro výrobu malého počtu odlitků složitých tvarů, které při výrobě vyžadující složitá jádra. Výhody tohoto procesu jsou nízké náklady. Nevýhodou tohoto procesu je malá produktivita práce, minimální tloušťka stěny odlitku je 3 až 5 mm, nízká lineární tolerance (např. 4 mm na m), drsnost povrchu ( $R_a = 6,5$  až  $12,5 \mu\text{m}$ ) a větší hmotnost odlitků než je hmotnost odlitků litých pod tlakem. Slévárny, které odlévají neželezné slitiny, používají tradičně dřevěné modely, které se mohou přizpůsobit jednotlivým typům odlitků. Gravitačně se odlévají slitiny zinku označované ZA-12 (ZL12/ZL1110) a ZA-27 (ZL27/ZL2720). Proces umožňuje velkou přizpůsobivost velikosti a tvaru odlitků, použití jader pro vnitřní zářezy a vnitřní dutiny, které jsou obtížné nebo neuskutečnitelné např. trvalou formou, [29].

### 3.3 Odstředivé lití

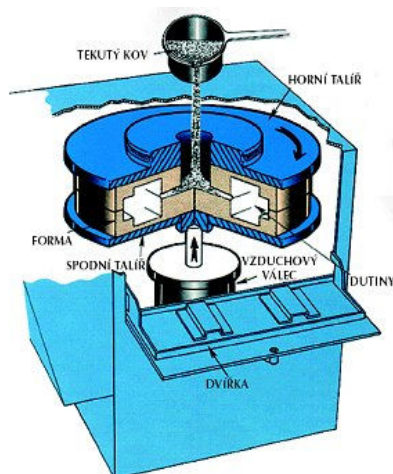
Odstředivé lití je technologie založená na využití forem ze silikonové pryže a odstředivé síly. Formy používané při tomto způsobu odlévání mají kruhový tvar s dutinami umístěnými po obvodu, viz obr. 3-7. Roztavená zinková slitina se přivede do středu rotující formy. Rotace vytváří odstředivý vstřikovací tlak, který tlačí odlévaný materiál do dutin formy. Na obr. 3-8 je ukázka stroje TWINCASTERS pro odstředivé lití od firmy TEKCAST Industries, Inc. Obr. 3-9 zobrazuje průřez strojem pro odstředivé lití a popisuje jeho základní pracovní části, [38].



Obr. 3-7 Silikonová forma pro odstředivé lití slitin zinku [39]



Obr. 3-8 Stroj pro odstředivé lití od firmy Tekcast [38]



Obr. 3-9 Schéma stroje pro odstředivé lití s detailem řezu formy, [38]

Modely jsou ručně zaformovány do měkké nevulkanizované formovací hmoty. Je možné vytvořit libovolně členitou dělicí rovinu. Forma s modely a separací určenou dělicí rovinou je uzavřena do vulkanizačního rámu a vložena do vulkanizačního lisu. V lisu, za teploty 180 °C a za vysokého tlaku, proběhne vulkanizace formovací hmoty do pevného stavu s dutinou věrně kopírující povrch a tvar modelu. Do dutiny je ručně nařezán vtokový a odvzdušňovací systém. Forma je připravena k odlévání. Odstředivé lití je vynikající technologií na výrobu odlitků prototypových sérií ve všech odvětvích průmyslu.

Odstředivým litím lze vyrábět vysoce kvalitní a přesné dekorativní předměty, povrchově upravené pokovením, barvením, lakováním i leštěním. Stejně tak lze vyrábět

nábytková kování, panty, klíče a různé mechanické součásti vhodné pro jakékoli odvětví. Odstředivé lití nabízí vyšší kvalitu v oblasti pevnosti materiálů, přesnosti odlitků a lepší reprodukci detailů. Tento způsob lití nabízí možnost výroby součástí stejných jako při lití do kovových forem nebo vyráběných obráběním, ale při mnohem nižších finančních nákladech a velké úspoře času a práce.

Odlitky vyrobené odstředivým litím ze slitin zinku, viz obr. 3-10, jsou rozměrově přesné, povrchově velmi kvalitní, s minimálními požadavky na další opracování. Dosahovaná tolerance součástí se pohybuje v průměru mezi 0,05 až 0,1 mm. Maximální rozměr odlitku je vymezen rozměry formovacích rámců, které bývají 220 x 150 x 80 mm. Maximální hmotnost odlitku je cca 1,0 až 1,5 kg.

Výrobou odlitků odstředivým litím se v České republice zabývá firma Kovovýroba - Ostrava, Slévárna slitin zinku - Pelhřimov, Kovoobrábění Vojtěch Janků - Zašová, TEOLI spol. s r.o. - Žďár nad Sázavou, ZIREL - Ostrava, ALFE Brno, s r.o.



Obr. 3-10 Typy odlitků ze slitin zinku litých metodou odstředivého lití (výroba fa. ALFE Brno a TEOLI spol. s r.o.) [39], [40]

### 3.4 Sklopné lití

Další metoda odlévání slitin zinku je známá jako "zvrtné výklopné lití", nejčastěji v literatuře uváděno jako sklopné lití. Při tomto procesu se používají formy vyrobené z bronzu. Bronzová forma umožňuje zinkové slitině odlít do formy a vylít zpět před celkovým ztuhnutím odlitku. Po odlití do formy se tavenina rychle ochladí pouze na lici formy. To umožňuje vylít zbylé taveniny z formy. Toto je výhodné pro výrobu dutých ozdobných předmětů jako jsou svícny, lampy, sochy a podobně, [29].

Z uvedených technologií výroby odlitků ze slitin zinku nejvíce používaná je metody vysokotlakého lití s použitím strojů s teplou vertikální komorou.





## 4. VÝPOČTOVÉ METODY PŘI SLEDOVÁNÍ VLASTNOSTÍ ČISTÉHO ZINKU

V této kapitole jsem provedla na základě nastudování obecných zákonitostí „*Termodynamika metalurgických procesů*“ výpočty různých termodynamických veličin. Hlavní pozornost byla věnována fázovým přeměnám bez účasti plynné fáze, především tání a krystalizaci kovů. Při tání za stálého tlaku je charakteristickou veličinou teplota tání ( $T_{\text{tání}}$ ) a latentní teplo tání ( $\Delta H_{\text{tání}} > 0$ ), které se spotřebovává na rozrušení tuhé fáze a přechod kovu do kapalné fáze. Gibbsovou energii pro tání lze vypočítat:  $\Delta G_{\text{tání}} = \Delta H_{\text{tání}} - T \cdot \Delta S_{\text{tání}}$ . Pro tání platí podmínka  $\Delta G_{\text{tání}} = 0$ . Na základě těchto podmínek lze vypočítat změnu entropie při tání, [41], [42].

### 4.1 Aplikace termodynamických výpočtů pro stanovení podmínek tavení a krystalizace čistého zinku

V rámci řešení této práce byly provedeny tyto dílčí výpočty:

1. Výpočet změny molární entropie při tavení čistého zinku.
2. Výpočet změny molární entalpie při tavení 1 molu čistého zinku z teploty 298 K na teplotu 692,5 K. A současně byla stanovena tepelná energie potřebná při tavení 1 kg čistého zinku z této teploty, která byla řešena na základě termodynamického procesu.
3. Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na teplotě při konstantním tlaku 101 325 Pa.
4. Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na tlaku při konstantní teplotě 692,5 K.
5. Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na teplotě a tlaku.

Při řešení fyzikálního procesu tavení čistého zinku byly použity termodynamické hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce v příloze č. 7.



#### 4.1.1 Výpočet změny molární entropie při tavení čistého zinku

Výpočet změny molární entropie při tavení čistého zinku lze stanovit na základě vztahu:

$$\Delta S^0_{\text{tání}} = \frac{\Delta H_{\text{tání}}}{T_{\text{tání}}}, \quad (4.1)$$

kde značí:  $\Delta S^0_{\text{tání}}$  - změna entropie při tání;

$\Delta H_{\text{tání}}$  - změna entalpie při tání;

$T_{\text{tání}}$  - teplota tání čistého zinku (419,5 °C).

Po dosazení hodnot uvedených v tabulce v příloze č. 7 do rovnice (4.1) je získána výsledná změna entropie pro 1 mol čistého zinku:

$$\Delta S_{\text{tání}} = \mathbf{9,640} \text{ [J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}.$$

Přepočet 1 kg na 1 mol je dle známé rovnice:

$$n = \frac{m}{M} \quad (4.2)$$

kde značí:  $m$  - hmotnost v [g];

$M$  - molovou hmotnost.

Pro čistý zinek lze do rovnice (4.2) dosadit hodnotu molové hmotnosti uvedenou v tabulce v příloze č. 7:

$$n = \frac{1 \cdot 10^3}{65,37}$$

$$n = \mathbf{15,298} \text{ molů}$$

Změna entropie pro tavení 1 kg čistého zinku:

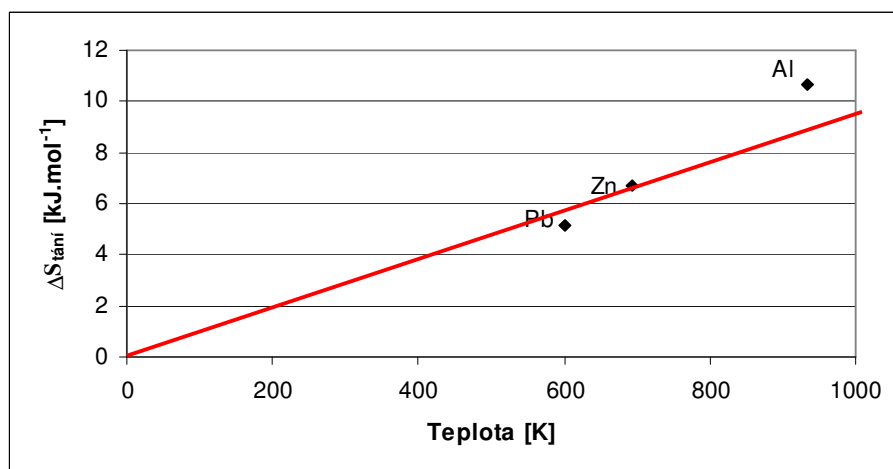
$$\Delta s = \Delta S_{\text{tání}} \cdot n = 9,64 \cdot 15,298$$

$$\Delta s = \mathbf{147,473} \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

Rovnici (4.1) lze vyjádřit pro výpočet změny entalpie čistého zinku nebo jiných kovů při teplotě tání:

$$\Delta H_{\text{tání}} = \Delta S_{\text{tání}} \cdot T_{\text{tání}} \quad (4.3)$$

Rovnice (4.3) vyjadřuje přímku, která prochází počátkem a její směrnice pro čistý zinek je  $\Delta S_{\text{tání}} 9,640 \text{ [J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ .



Obr. 4-1 Grafická závislost  $\Delta S_{\text{tání}}$  na teplotě

#### 4.1.2 Výpočet změny molární entalpie při tavení čistého zinku

Teplotní závislost přírůstku molární entalpie tekutého čistého zinku je tabelována:

$$\Delta H_T = H_T - H_{298} = 31,43 \cdot T - 4280 \quad (4.3a)$$

$$\Delta H = 17\,485,275 \text{ [J.mol}^{-1}]$$

Na základě rovnice (4.3a) je možné provést výpočet množství tepelné energie, které je třeba dodat na ohřev 1 kg čistého zinku z teploty 298 K (25 °C) na teplotu tání čistého zinku 692,5 K (419,5 °C).

Pro 1 kg čistého zinku:

$$\Delta h = h_{692,5} - h_{298} = 15,298 \cdot (31,43 \cdot 692,5 - 4280)$$

$$\Delta h = 267\,489,737 \text{ [J]}$$

##### 4.1.2.1 Výpočet molární entalpie čistého zinku při tavení a jeho přehřátí na teplotu T

Výpočet molární entalpie je proveden na základě integrace Kirchhoffovy rovnice, která vyjadřuje teplotní závislost změny molární entalpie za konstantního tlaku:

$$\left( \frac{d(\Delta H)}{dT} \right)_P = \Delta C_p, \quad (4.4)$$



kde značí:  $d(\Delta H)$  - diferenciál přírůstku molární entalpie;  
 $dT$  - diferenciál teploty;  
 $\Delta C_p$  - změnu molární tepelné kapacity látky za konstantního tlaku.

Molární tepelná kapacita pro tuhý čistý zinek je tabelována:

$$\text{Zn (s): } C_p = 22,42 + 10,06 \cdot 10^{-3} \cdot T - 0,10^5 \cdot T^{-2} \text{ [J.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

a platí pro teplotní interval  $<298 \text{ až } 692,5 \text{ K}>$ . Současně je také tabelovaná konstanta  $d$ , která pro čistý zinek v tuhém stavu činí  $-7127 \text{ [J.mol}^{-1}]$ . Tuto hodnotu lze vypočítat tak, jak je uvedeno níže.

Na základě hodnoty molární tepelné kapacity pro tuhý stav čistého zinku lze získat obecnou rovnici pro rozdíl molárních entalpií ( $H_T - H_{298}$ ):

$$H_T - H_{298} = 22,42 \cdot T + \frac{10,06}{2} \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 0 \cdot 10^5 \cdot T^{-1} + d \quad (4.5)$$

$$d = -22,42 \cdot 298 - \frac{10,06}{2} \cdot 10^{-3} \cdot 298^2 - 0 \cdot 10^5 \cdot 298^{-1} = -7127 \text{ [J.mol}^{-1}].$$

Rovnici (4.5) lze zapsat do tohoto jednoduchého tvaru:

$$H_T - H_{298} = 22,42 \cdot T + 5,03 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 7127 \quad (4.6)$$

Dosazení do rovnice (4.6) za teplotu  $T = 692,5 \text{ K}$  lze stanovit hodnotu změny molární entalpie pro teplotní interval  $<298 \text{ až } 692,5 \text{ K}>$ , lze psát:

$$H_{692,5} - H_{298} = 22,42 \cdot 692,5 + 5,03 \cdot 10^{-3} \cdot 692,5^2 - 7127.$$

$$H_{692,5} - H_{298} = \mathbf{10\ 811,018 \text{ [J.mol}^{-1}]}$$

K tomuto výsledku je třeba připočítat molární entalpii tání ( $\Delta H_{\text{tání}}$ ), která pro čistý zinek činí  $6676 \text{ [J.mol}^{-1}]$ .

Pro roztavení 1 molu čistého zinku je potřeba **17 487,018 [J]**.

Při přepočtu stanovení entalpie na roztavení 1 kg čistého zinku lze psát:  
 $17487,018 \cdot 15,298 = \mathbf{267\ 516,401 \text{ [J]}}$ .

Molární tepelná kapacita pro tekutý čistý zinek je též tabelována:

$$\text{Zn (l): } C_p = 31,43 \text{ [J.mol}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$$

a platí pro teplotní interval <692,5 až 1200 K>. Současně je také tabelovaná konstanta  $d$ , která pro tekutý čistý zinek činí  $-4280 \text{ [J.mol}^{-1}\text{]}$ . Na základě rovnice (4.5) lze stanovit rovnici pro změnu molární entalpie platící pro teploty vyšší než je teplota tání čistého zinku 692,5 K:

$$H_T - H_{298} = 31,43 \cdot T + d. \quad (4.7)$$

Z této rovnice lze stanovit změnu molární entalpie, např. pro teplotu přehřátí taveniny čistého zinku na teplotu 550 °C (823 K). Po dosazení za teplotu  $T = 823 \text{ [K]}$ , lze psát:

$$H_{823} - H_{298} = 31,43 \cdot 823 - 4280.$$

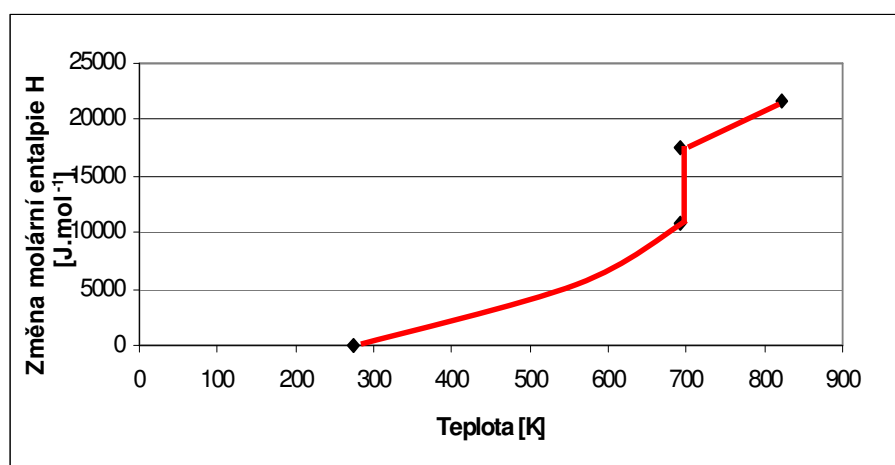
$$H_{823} - H_{298} = \mathbf{21\,586,89 \text{ [J.mol}^{-1}\text{]}}$$

Získanou hodnotu změny molární entalpie lze přepočítat pro 1 kg čistého zinku a jeho přehřátí na teplotu 550 °C (823 K). Lze psát:

$$21586,89 \cdot 15,298 = \mathbf{330\,236,243 \text{ [J]}}$$

Na obr. 4-2 je závislost změny molární entalpie čistého zinku v závislosti na teplotě:

$$\Delta H = \Delta H_{823} - \Delta H_{298} = \mathbf{21\,586,89 \text{ [J.mol}^{-1}\text{]}}.$$



Obr. 4-2 Závislost molární entalpie zinku na teplotě



### 4.1.3 Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na teplotě při konstantním tlaku 101 325 Pa

Tání zinku lze vyjádřit na základě rovnice:

$$\left( \frac{\partial G_T}{\partial T} \right)_P = -S_T. \quad (4.8)$$

Integrací rovnice (4.8) lze získat závislost  $\Delta G_{\text{tání}} = f(T)$  při konstantním tlaku:

$$\Delta G_{\text{tání}} = \int -\Delta S_{\text{tání}} \cdot dT. \quad (4.9)$$

Pro konstantní změnu molární entropie po integraci lze získat vztah pro změnu Gibbosvy energie pro tavení:

$$\Delta G_{\text{tání}} = -\Delta S_{\text{tání}} \cdot T + C \quad (4.10)$$

kde značí:  $C$  - integrační konstantu, kterou lze určit z podmínky  $\Delta G_{\text{tání}} = 0$  při teplotě 692,5 K.

Dosažením do rovnice (4.10) lze psát:

$$0 = -9,64 \cdot 692,5 + C$$

a je možno určit konstantu  $C$ :

$$C = 6675,7$$

$$\Delta G_{\text{tání}} = -9,64 \cdot T + 6675,7 \quad (4.11)$$

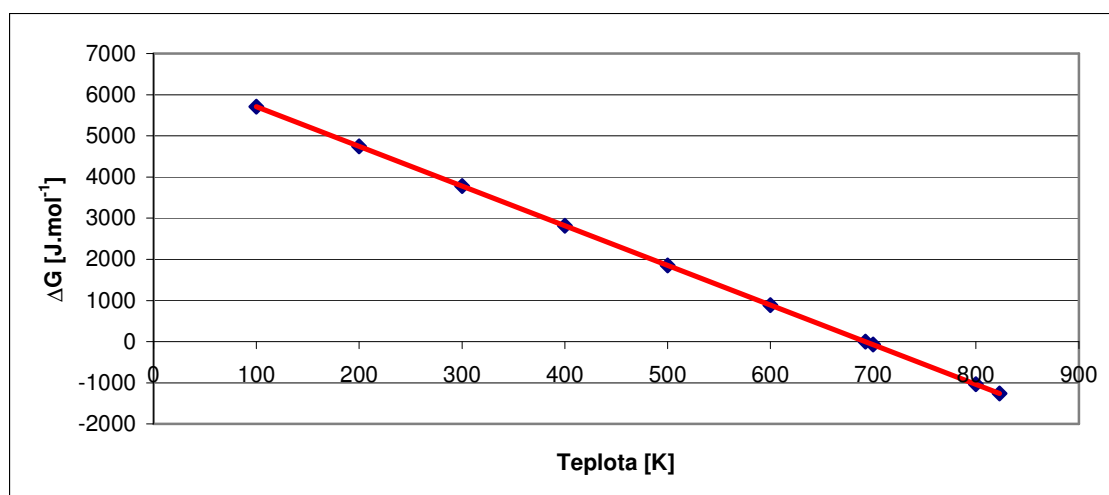
Stanovení hodnoty  $\Delta G_{\text{tání}}$  zinku při celkovém tlaku 101 325 Pa a pro různé teploty, pro 1 mol a 1 kg čistého zinku je v tabulce 4.1.

Na obr. 4-3 je uvedena závislost změny Gibbsovy energie na teplotě při tavení čistého zinku.

**Tabulka 4.1** Hodnoty  $\Delta G_{\text{tání}}$  čistého zinku při standardním tlaku a různých teplotách

Teplota [K]	Hodnota $\Delta G$	
	$\Delta G_{\text{tání}} = -9,64.T + 6675,7$ [J.mol <sup>-1</sup> ]	[J.kg <sup>-1</sup> ]
100	5711,7	87331,89
200	4747,7	72592,33
300	3783,7	57852,77
400	2819,7	43113,21
500	1855,7	28373,65
600	891,7	13634,09
692,5	0	0
700	-72,3	-1105,47
800	-1036,3	-15845,03
823	-1258,02	-19245,19

**Poznámka:** 1 kg čistého zinku = 15,29 molů



Obr. 4-3 Závislost změny Gibbsovy energie na teplotě při tavení čistého zinku

#### 4.1.4 Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na tlaku při konstantní teplotě 692,5 K

V návaznosti na předchozí výpočty změny Gibbsovy energie v závislosti na teplotě při konstantním tlaku jsem provedla výpočet na základě změny Gibbsovy energie při tavení zinku v závislosti na tlaku při konstantní teplotě 692,5 K.

Tato závislost vychází z úvahy, že při teplotě tání čistého zinku (692,5 K) dochází ke změně molového objemu, která je  $0,346 \cdot 10^{-6}$  [m<sup>3</sup>.mol<sup>-1</sup>]. Současně lze předpokládat, že změna molového objemu  $\Delta V$  zinku nezávisí na tlaku.



Pro tání čistého zinku platí, že  $Zn(s) = Zn(l)$ , pak pro izotermický děj ( $dT = 0$ ) lze odvodit vztah pro stanovení změny Gibbsovy energie:

$$dG_T = V \cdot dP. \quad (4.12)$$

Po integraci lze zapsat závislost  $\Delta G_{\text{tání}}$  na tlaku pro konstantní teplotu:

$$\Delta G_{\text{tání}} = \int \Delta V \cdot dP. \quad (4.13)$$

Pro konstantní hodnotu  $\Delta V$  a po integraci (4.13) získáme:

$$\Delta G_{\text{tání}} = \Delta V \cdot P + C \quad (4.14)$$

kde značí:  $\Delta V$  - změnu molárního objemu nezávislého na tlaku;

$P$  - tlak;

$C$  - integrační konstantu, kterou lze stanovit z podmínky  $\Delta G_{\text{tání}} = 0$  při teplotě 692,5 K.

Dosažením do rovnice (4.14) lze psát:

$$0 = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot 101325 + C$$

a je možno určit konstantu  $C$ :

$$C = -0,03505845$$

Závislost Gibbsovy energie v závislosti na tlaku má tvar:

$$\Delta G_{\text{tání}} = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot P - 0,03505845$$

kde značí:  $P$  - tlak působící při tavení zinku [Pa].

V tabulce 4.2 jsou vypočítány hodnoty změny Gibbsovy energie v závislosti na tlaku při konstantní teplotě tání.

Směrnice přímky na obr. 4-4 se rovná změně molového objemu čistého zinku při tání. Zvýšení tlaku vyvolá tuhnutí taveniny zinku<sup>\*)</sup> a naopak snížení tlaku způsobuje jeho tavení.

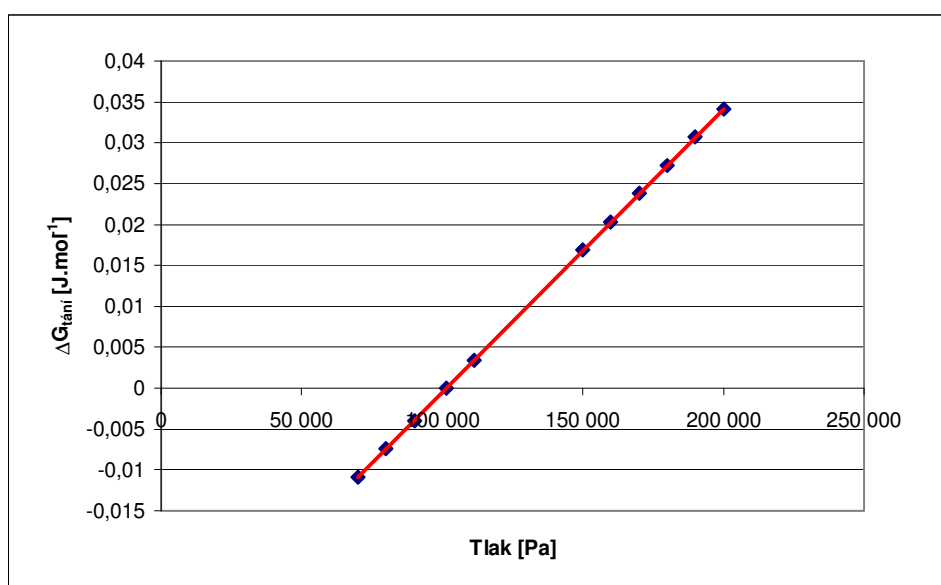
**Poznámka:** \*) To má za význam především při tlakovém lítí čistého zinku a slitin zinku. Čili, má-li tavenina vyšší molový objem než tuhá fáze, pak zvýšení tlaku způsobuje tuhnutí. K tomu u tlakového lítí přispívá i vysoká akumulární schopnost tlakové formy.



**Tabulka 4.2 Výpočet změny Gibbsovy energie v závislosti na tlaku při konstantní teplotě tání**

Tlak [Pa]	Hodnota $\Delta G$	
	$\Delta G_{\text{tání}} = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot P - 0,03505845 \text{ [J.mol}^{-1}\text{]}$	[J.kg <sup>-1</sup> ]
70 000	-0,01083845	-0,165806608
80 000	-0,00737845	-0,112875528
90 000	-0,00391845	-0,059944448
101 325	0	0
111 325	0,00346000	0,052931080
150 000	0,01684155	0,257642031
160 000	0,02030155	0,310573111
170 000	0,02376155	0,363504191
180 000	0,02722155	0,416435271
190 000	0,03068155	0,469366351
200 000	0,03414155	0,522297431

**Poznámka:** Tlak je roven  $p = p_0 \pm \Delta p$ ;  $p_0 = 101\,325 \text{ [Pa]}$ .



Obr. 4-4 Závislost změny Gibbsovy energie čistého zinku na tlaku při konstantní teplotě tání (692,5 K)

#### 4.1.5 Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na teplotě a tlaku

Toto stanovení vychází z předpokladu, že změna molového objemu čistého zinku je  $0,346 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}\text{]}$  při teplotě tání 692,5 [K] a změna molární entropie je  $9,64 \text{ [J.K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}\text{]}$ .

Tání čistého zinku  $\text{Zn(s)} = \text{Zn(l)}$ .



Závislost změny Gibbsovy energie na teplotě a tlaku:

$$d\Delta G_{\text{tání}} = \Delta V_{\text{tání}} \cdot dP - \Delta S_{\text{tání}} \cdot dT. \quad (4.15)$$

Po integraci rovnice (4.15) podle tlaku a teploty získáme:

$$\Delta G_{\text{tání}} = \Delta V_{\text{tání}} \cdot P - \Delta S_{\text{tání}} \cdot T + C. \quad (4.16)$$

kde značí:  $\Delta V_{\text{tání}}$  - změnu objemu čistého zinku při tání;

$P$  - tlak;

$\Delta S_{\text{tání}}$  - změnu entropie čistého zinku při tání;

$T$  - teplotu;

$C$  - integrační konstantu, kterou lze vypočítat z podmínky  $\Delta G_{\text{tání}} = 0$  při teplotě tání 692,5 K a tlaku 101 325 Pa.

Dosazením příslušných hodnot veličin do rovnice (4.16) získáme:

$$0 = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot 101325 - 9,64 \cdot 692,5 + C$$

a je možno určit konstantu  $C$ :

$$C = 6\,675,664942$$

Závislost změny Gibbsovy energie  $\Delta G_{\text{tání}}$  v závislosti na teplotě a tlaku má tvar:

$$\Delta G_{\text{tání}} = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot P - 9,64 \cdot T + 6675,664942 \text{ [J.mol}^{-1}\text{]} \quad (4.17)$$

Na základě této rovnice lze zkontrolovat při jaké teplotě a tlaku se taví čistý zinek<sup>\*)</sup>. Procesu tání odpovídá podmínka  $\Delta G_{\text{tání}} = 0$ .

**Poznámka:** <sup>\*)</sup> pokud uvažujeme tlak 101 325 [Pa] a teplotu 692,5 K.

Teplotu tání čistého zinku lze vypočítat dosazením do rovnice (4.17) pro tlak = 101 325 [Pa]:

$$0 = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot 101325 - 9,64 \cdot T + 6675,664942$$

$$T_{\text{tání}} = T = \frac{6675,7}{9,64} = 692,5 \text{ [K]}$$

Tlak tání čistého zinku lze vypočítat dosazením do rovnice (4.17) pro teplotu 692,5 [K]:

$$0 = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot P - 9,64 \cdot 692,5 + 6675,664942$$

$$P_{\text{tání}} = P = \frac{0,03505845}{0,346 \cdot 10^{-6}} = 101325 \text{ [Pa]}$$



Současně lze vypočítat i velikost tlaku působícího při tavení čistého zinku, pokud bychom chtěli teplotu tání zinku zvýšit na hodnotu 823 K.

$$0 = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot P_1 - 9,64 \cdot 823 + 6675,664942$$

$$P_1 = \frac{1258,055058}{0,346 \cdot 10^{-6}} = 3635997277 [\text{Pa}]$$

$$3635997277 - 101325 = \mathbf{3\ 635\ 895\ 952\ [\text{Pa}]}$$

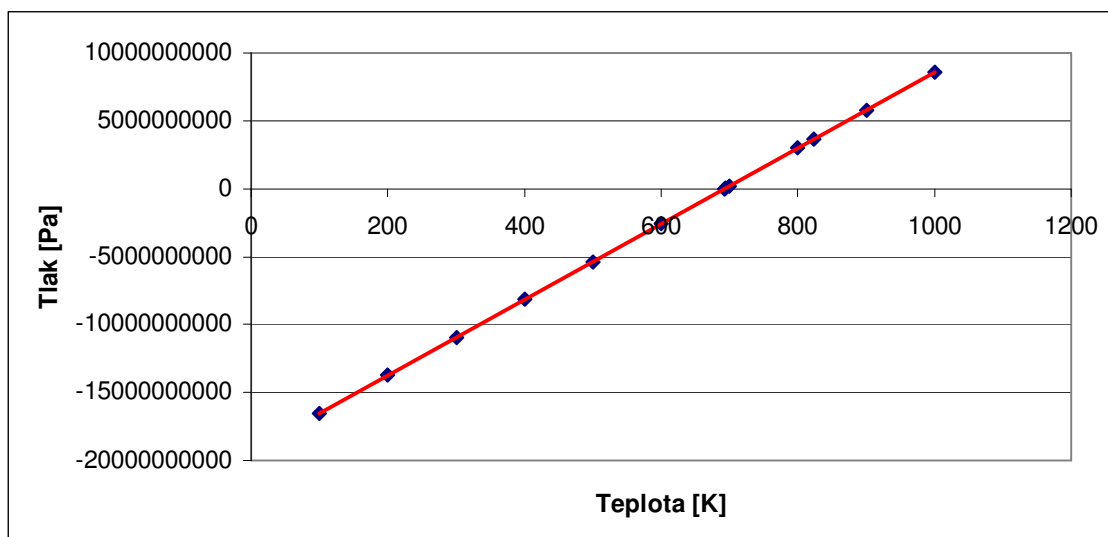
Čistý zinek se bude tavit při teplotě 823 [K] pokud vyvodíme na čistý zinek tlak 3 635 997 277 [Pa], resp. zvýšíme tlak o 3 635 895 952 [Pa].

V tabulce 4.3 jsou uvedeny souvislosti mezi hodnotou tlaku a jemu odpovídající hodnoty teploty tavení. Na obr. 4-5 je uvedena závislost změny Gibbsovy energie na teplotě a tlaku při tavení čistého zinku.

**Tabulka 4.3 Hodnoty tlaku odpovídající různým teplotám tavení čistého zinku**

Teplota tání zinku [K]	$P_1$ Hodnota tlaku [Pa]	$p^0$ Hodnota atmosférického tlaku [Pa]	$\Delta p$ Zvýšení tlaku působícího na tání zinku
<b>100</b>	-16507702145	101 325	-16 507 803 470
<b>200</b>	-13721574977	101 325	-13 721 676 302
<b>300</b>	-10935447809	101 325	-10 935 549 134
<b>400</b>	-8149320642	101 325	-8 149 421 967
<b>500</b>	-5363193474	101 325	-5 363 294 799
<b>600</b>	-2577066306	101 325	-2 577 167 631
<b>692,5</b>	101325	101 325	0
<b>694</b>	41893231,21	101 325	41 791 906
<b>700</b>	209060861,3	101 325	208 959 536
<b>800</b>	2995188029	101 325	2 995 086 704
<b>823</b>	3635997277	101 325	3 635 895 952
<b>900</b>	5781315197	101 325	5 781 213 872
<b>1000</b>	8567442364	101 325	8 567 341 039

**Poznámka:**  $P_1 = P^0 + \Delta P$ ;  $P^0 = 101\ 325\ [\text{Pa}]$



Obr. 4-5 Závislost změny Gibbsovy energie na teplotě a tlaku při tavení čistého zinku

## 4.2 Výpočet tepelné energie vyvinuté při tuhnutí odlitku z čistého zinku a slitin zinku

Pro orientaci bylo počítáno množství tepelné energie (tepla), které je uvolňováno při tuhnutí a chladnutí odlitků z čistého zinku a slitin zinku (ZnAl4, ZnAl4Cu1, ZnAl4Cu3) odlévaných z různé teploty lití  $T_{lití}$ , krystalizujícího v intervalu teplot a chladnoucího na teplotu 20 °C.

Výpočet byl proveden pro dva různé odlitky:

1. odlitek tvaru desky s rozměry 220 x 160 x 20 mm;
2. odlitek tvaru válce o  $\varnothing$  60 x 70 mm.

Výpočet celkového množství tepla uvolněného odlitkem byl proveden dle rovnice:

$$Q_O = m_K \cdot \left[ \int_{T_L}^{T_{lití}} c_L \cdot dT + L_{KR} + \int_{T_S}^{T_{OK}} c_S \cdot dT \right] \quad (4.18)$$

Rovnice (4.18) po integraci:

$$Q_O = m_K \cdot [c_L (T_{lití} - T_L) + L_{KR} + c_S (T_S - T_{OK})], \quad (4.19)$$

kde značí:  $m_K$  - hmotnost odlévaného kovu;

$c_L$  - měrnou tepelnou kapacitu taveniny

$c_S$  - měrnou tepelnou kapacitu ztuhlé taveniny;

$L_{KR}$  - latentní krystalizační teplo;

$T_{\text{lití}}$  - teplotu taveniny při odlévání;

$T_L$  - teplotu počátku tuhnutí;

$T_S$  - teplotu konce tuhnutí;

$T_{\text{OK}}$  - konečnou teplotu odlitku.

V příloze č. 8 jsou uvedeny hodnoty důležitých fyzikální a tepelných veličin čistého zinku, slitin zinku a vybraných slévárenských materiálů.

1. Výpočet tepelné energie uvolněné taveninou resp. odlitkem tvaru desky 220 x 160 x 20 mm při tuhnutí a chladnutí z čistého zinku a slitin zinku

Výpočet tepelné energie pro odlitek z čistého zinku a slitin zinku byl proveden podle rovnice (4.18), resp. této rovnice po integraci, viz rovnice (4.19). Odlitek tvaru desky 220 x 160 x 20 mm má objem  $V = 0,000704 \text{ [m}^3\text{]}$ . Výpočet byl proveden pro různé teploty lití 400 až 600 °C. Konečná teplota odlitku byla 20 °C.

a) čistý zinek - tepelné a fyzikální veličiny použité pro výpočet jsou uvedeny v příloze č. 8, hustota čistého zinku v kapalném stavu je  $6570 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ ,  $c_L = 502 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $c_S = 385 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $L_{\text{KR}} = 112\,923 \text{ [J.kg}^{-1}\text{]}$ ,  $T_{\text{tání}} = 419,5 \text{ °C}$ . Hmotnost odlévané taveniny je 4,625 [kg].

b) slitina ZnAl4 - tepelné a fyzikální veličiny použité pro výpočet jsou uvedeny v příloze č. 8, hustota slitiny v kapalném stavu je  $6660 \text{ [kg. m}^{-3}\text{]}$ ,  $c_L = 436 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $c_S = 389 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $L_{\text{KR}} = 110\,000 \text{ [J.kg}^{-1}\text{]}$ ,  $T_L = 387 \text{ °C}$ ,  $T_S = 382 \text{ °C}$ . Hmotnost odlévané taveniny je 4,689 [kg].

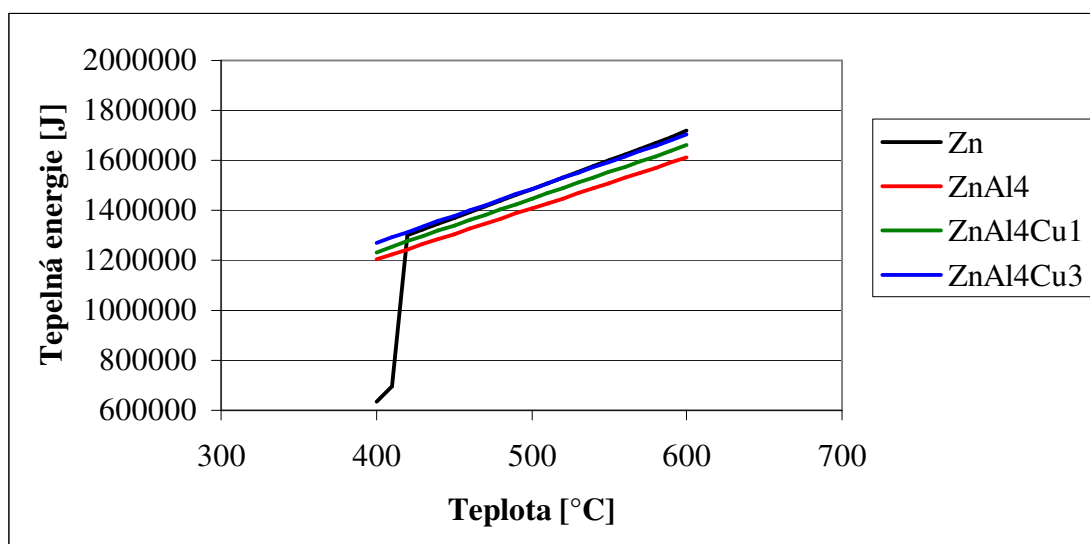
c) slitina ZnAl4Cu1 - tepelné a fyzikální veličiny použité pro výpočet, viz příloha č. 8, hustota slitiny v kapalném stavu je  $6750 \text{ [kg. m}^{-3}\text{]}$ ,  $c_L = 450 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $c_S = 395 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $L_{\text{KR}} = 110\,050 \text{ [J.kg}^{-1}\text{]}$ ,  $T_L = 386 \text{ °C}$ ,  $T_S = 3826 \text{ °C}$ . Hmotnost odlévané taveniny je 4,752 [kg].

d) slitiny ZnAl4Cu3 - tepelné a fyzikální veličiny použité pro výpočet, viz příloha č. 8, hustota slitiny v kapalném stavu je  $6760 \text{ [kg. m}^{-3}\text{]}$ ,  $c_L = 455 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $c_S = 420 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $L_{\text{KR}} = 110\,100 \text{ [J.kg}^{-1}\text{]}$ ,  $T_L = 390 \text{ °C}$ ,  $T_S = 382 \text{ °C}$ . Hmotnost odlévané taveniny je 4,759 [kg].

Vypočítané hodnoty tepelné energie jsou uvedeny v tabulce 4.4. Na obr. 4-6 je zobrazena závislost těchto hodnot tepelné energie.

**Tabulka 4.4** Množství tepelné energie uvolněné odlitkem tvaru desky 220x160x20 mm při tuhnutí a chlazení z teploty lití do teploty 20 °C

Teplota odlévané taveniny [°C]	Množství uvolněné tepelné energie při tuhnutí a chlazení odlitku [J]			
	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
400	633238	1202663	1232384	1269178
410	694444	1223107	1253768	1290831
420	1299459	1243551	1275152	1312485
430	1322676	1263995	1296536	1334138
440	1345894	1284439	1317920	1355792
450	1369111	1304883	1339304	1377445
460	1392329	1325327	1360688	1399098
470	1415546	1345771	1382072	1420752
480	1438764	1366215	1403456	1442405
490	1461981	1386659	1424840	1464059
500	1485199	1407103	1446224	1485712
510	1508416	1427547	1467608	1507366
520	1531634	1447991	1488992	1529019
530	1554851	1468435	1510376	1550673
540	1578069	1488879	1531760	1572326
550	1601286	1509323	1553144	1593979
560	1624504	1529767	1574528	1615633
570	1647721	1550212	1595912	1637286
580	1670939	1570656	1617296	1658940
590	1694156	1591100	1638680	1680593
600	1717374	1611544	1660064	1702247



Obr. 4-6 Tepelná energie uvolněná při tuhnutí a chlazení odlitku tvaru desky



## 2. Výpočet tepelné energie uvolněné taveninou resp. odlitkem tvaru válce $\varnothing 60 \times 70$ mm při tuhnutí a chladnutí z čistého zinku a slitin zinku

Výpočet tepelné energie pro odlitek z čistého zinku a slitin zinku byl proveden podle rovnice (4.18), resp. této rovnice po integraci, viz rovnice (4.19). Odlitek tvaru válce  $\varnothing 60 \times 70$  mm má objem  $V = 0,000198 \text{ [m}^3\text{]}$ . Výpočet byl proveden pro různé teploty lití 400 až 600 °C. Konečná teplota odlitku byla 20 °C.

a) čistý zinek - tepelné a fyzikální veličiny použité pro výpočet jsou uvedeny v příloze č. 8, hustota čistého zinku v kapalném stavu je  $6570 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ ,  $c_L = 502 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $c_S = 385 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $L_{KR} = 112\,923 \text{ [J.kg}^{-1}\text{]}$ ,  $T_{\text{tání}} = 419,5 \text{ °C}$ . Hmotnost odlévané taveniny je 1,301 [kg].

b) slitina ZnAl4 - tepelné a fyzikální veličiny použité pro výpočet jsou uvedeny v příloze č. 8, hustota slitiny v kapalném stavu je  $6660 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ ,  $c_L = 436 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $c_S = 389 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $L_{KR} = 110\,000 \text{ [J.kg}^{-1}\text{]}$ ,  $T_L = 387 \text{ °C}$ ,  $T_S = 382 \text{ °C}$ . Hmotnost odlévané taveniny je 1,319 [kg].

c) slitina ZnAl4Cu1 - tepelné a fyzikální veličiny použité pro výpočet, viz příloha č. 8, hustota slitiny v kapalném stavu je  $6750 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ ,  $c_L = 450 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $c_S = 395 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $L_{KR} = 110\,050 \text{ [J.kg}^{-1}\text{]}$ ,  $T_L = 386 \text{ °C}$ ,  $T_S = 382 \text{ °C}$ . Hmotnost odlévané taveniny je 1,337 [kg].

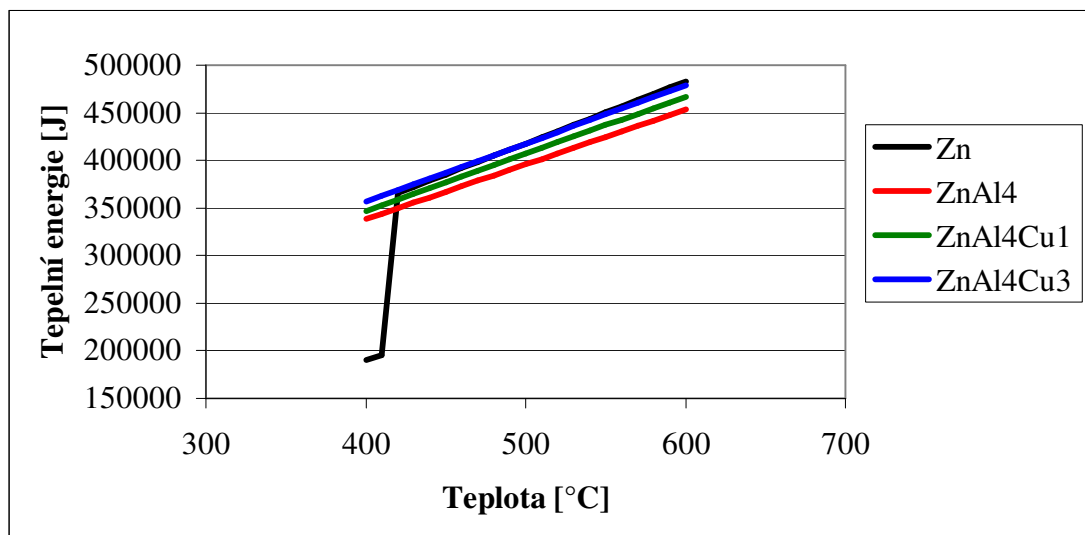
d) slitiny ZnAl4Cu3 - tepelné a fyzikální veličiny použité pro výpočet, viz příloha č. 8, hustota slitiny v kapalném stavu je  $6760 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ ,  $c_L = 455 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $c_S = 420 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$ ,  $L_{KR} = 110\,100 \text{ [J.kg}^{-1}\text{]}$ ,  $T_L = 390 \text{ °C}$ ,  $T_S = 382 \text{ °C}$ . Hmotnost odlévané taveniny je 1,338 [kg].

Vypočítané hodnoty tepelné energie jsou uvedeny v tabulce 4.5. Na obr. 4-7 je zobrazena závislost těchto hodnot tepelné energie.

**Tabulka 4.5** Množství tepelné energie uvolněné odlitkem tvaru válce Ø 60 x 70 mm při tuhnutí a chladnutí z teploty lití do teploty 20 °C

Teplota odlévané taveniny [°C]	Množství uvolněné tepelné energie při tuhnutí a chladnutí odlitku [J]			
	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
400	190336	338305	346738	356831
410	195345	344056	352754	362919
420	365534	349807	358771	369007
430	372065	355558	364787	375095
440	378596	361308	370804	381183
450	385127	367059	376820	387271
460	391658	372810	382837	393359
470	398189	378561	388853	399447
480	404720	384312	394870	405534
490	411251	390063	400886	411622
500	417782	395813	406903	417710
510	424313	401564	412919	423798
520	430844	407315	418936	429886
530	437375	413066	424952	435974
540	443906	418817	430969	442062
550	450437	424568	436985	448150
560	456968	430318	443002	454238
570	463499	436069	449018	460326
580	470030	441820	455035	466413
590	476562	447571	461051	472501
600	483093	453322	467068	478589

**Poznámka:** Čistý zinek taje při teplotě až při teplotě 420 °C, proto při teplotě 400 a 410 °C jde jen o jeho ohřev bez fázové přeměny



Obr. 4-7 Tepelná energie uvolněná při tuhnutí a chladnutí odlitku tvaru válce Ø 60 x 70 mm ze zinku a jeho slitin





## 5. EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ SLÉVÁRENSKÝCH VLASTNOSTÍ ČISTÉHO ZINKU A SLITIN ZINKU

V této kapitole jsme se zaměřila na zpřesnění některých hodnot vybraných vlastností čistého zinku a slitin zinku. Bylo to z toho důvodu, že odborná literatura hodnotí vlastnosti slitin za velmi dobré, avšak v žádné dostupné literatuře nelze zjistit některé konkrétní hodnoty.

Dle možností laboratorního vybavení Katedry strojírenské technologie budou sledovány tyto slévárenské vlastnosti:

- a) tavitelnost;
- b) zabíhavost;
- c) sledování průběhu a doby tuhnutí odlitků;
- d) sledování náchylnosti na vznik trhlin;
- e) sledování lineárního smršťování odlitků tvaru I.

Dále bylo toto experimentální sledování slévárenských vlastností čistého zinku a slitin zinku doplněno o metalografické hodnocení struktury.

### 5.1 Použité slévárenské materiály

Pro všechny níže uvedené experimenty byl použit čistý zinek, (Zn), čistota 99,6 % a slitiny zinku ZnAl4, ZnAl4Cu1, ZnAl4Cu3. Chemické složení těchto slitin je uvedeno v tabulce 5.1, bylo získáno analyzátozem (Quantron Advanced Analytical Systems) ve firmě Beneš a Lát, s.r.o. Tavenina byla tavena v grafitovém kelímku v odporové peci (výrobce BEZ Bratislava). Před každým odléváním byla tavenina metalurgicky ošetřena, zbavena strusky popř. vměstků. Současně bylo provedeno měření teploty taveniny těsně před jejím odlitím pomocí digitálního teploměru MIKROTERM (výrobce Závody měřicí a regulační techniky Polička), aby byly zajištěny pokud možno stejné podmínky experimentů. Před každým odléváním tavenina byla pečlivě rafinována solí T3 a z povrchu byla odstraněna struska.

Tabulka 5.1 Chemické složení použitých slitin zinku

Slitiny zinku	Chemické složení [hmot. %]				
	Al	Cu	Mg	Fe	Zn
ZnAl4	4,0	0,1	0,05	0,070	zbytek
ZnAl4Cu1	3,9	1,1	0,04	0,075	zbytek
ZnAl4Cu3	3,9	2,9	0,05	0,080	zbytek

**Poznámka:** Chemické složení bylo převzato z atestů, které byly součástí housek slévárenských slitin zinku, získaných z firmy Beneš a Lát, s.r.o.

## 5.2 Tavitelnost

Tavení kovů a jejich slitin je jednou ze základních slévárenských operací a někdy i operací nejobtížnější. Tavitelnost se posuzuje podle teploty tavení. Podle toho rozlišujeme slitiny s nízkou, střední a vysokou teplotou tavení. Nejlépe tavitelné jsou slitiny s nízkou teplotou tavení, malým měrným teplem, malým skupenským teplem tavení a eutektické slitiny. Tavení čistých kovů s vysokou tepelnou vodivostí nebo které vykazují vysokou afinitu ke kyslíku, popř. které mají stejnorodou strukturou, bývá obtížné. Výpočet množství tepla pro přehřátí určitého množství čistého zinku a slitin zinku byl proveden dle rovnice:

$$Q = m \cdot [c_S \cdot (T_S - T_{20}) + L_{KR} + c_L \cdot (T_{\text{přehřát}} - T_L)] \text{ [J]} \quad (5.1)$$

kde značí:  $m$  - hmotnost [kg];

$c_S$  - měrná tepelná kapacita v tuhém stavu [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ];

$T_S$  - teplota solidu [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$T_{20}$  - teplota okolí [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$L_{KR}$  - latentní krystalizační teplo [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ];

$c_L$  - měrná tepelná kapacita v kapalném stavu [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ];

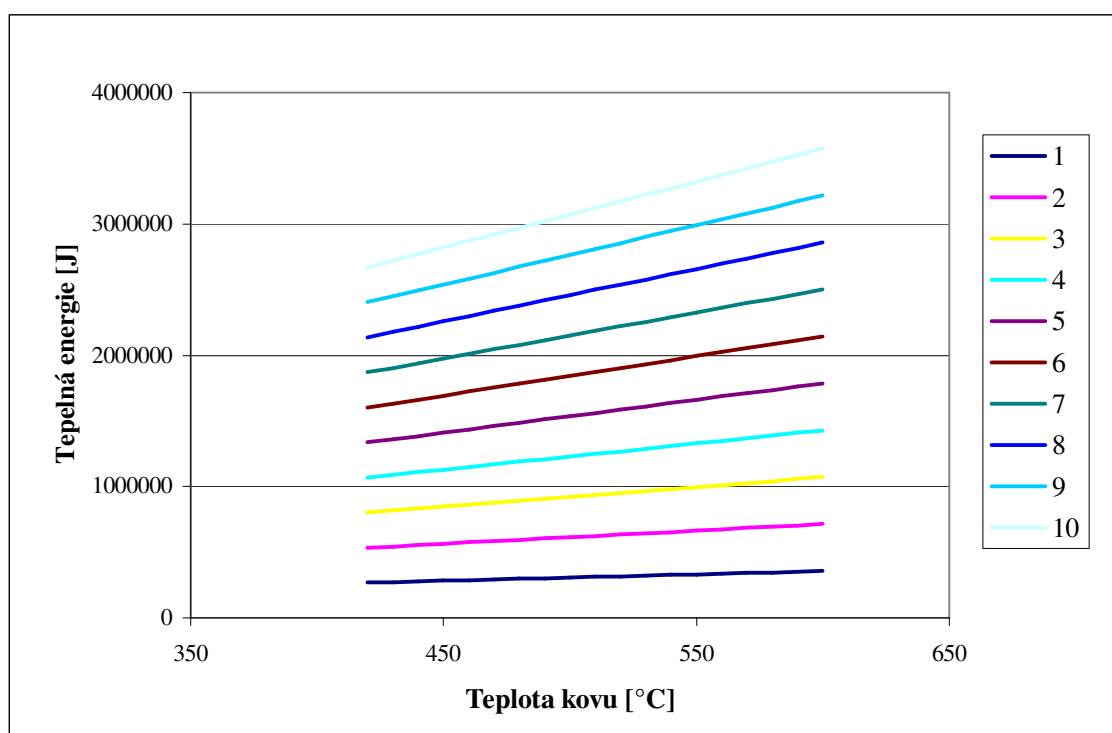
$T_{\text{přehřátí}}$  - teplota přehřátí taveniny [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$T_L$  - teplota likvidu [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Pro výpočet byly použity hodnoty tepelných a fyzikálních vlastností čistého zinku a slitin zinku uvedených v příloze č. 8. V tabulkách 5.2, 5.3, 5.4 a 5.5 jsou uvedeny hodnoty množství tepla potřebného pro ohřátí nebo přehřátí různého množství kovu čistého zinku a slitin zinku. Na obr. 5-1, 5-2, 5-3 a 5-4 jsou grafické závislosti těchto hodnot.

**Tabulka 5.2 Množství tepla potřebného pro ohřátí a přehřátí 1 až 10 kg čistého zinku**

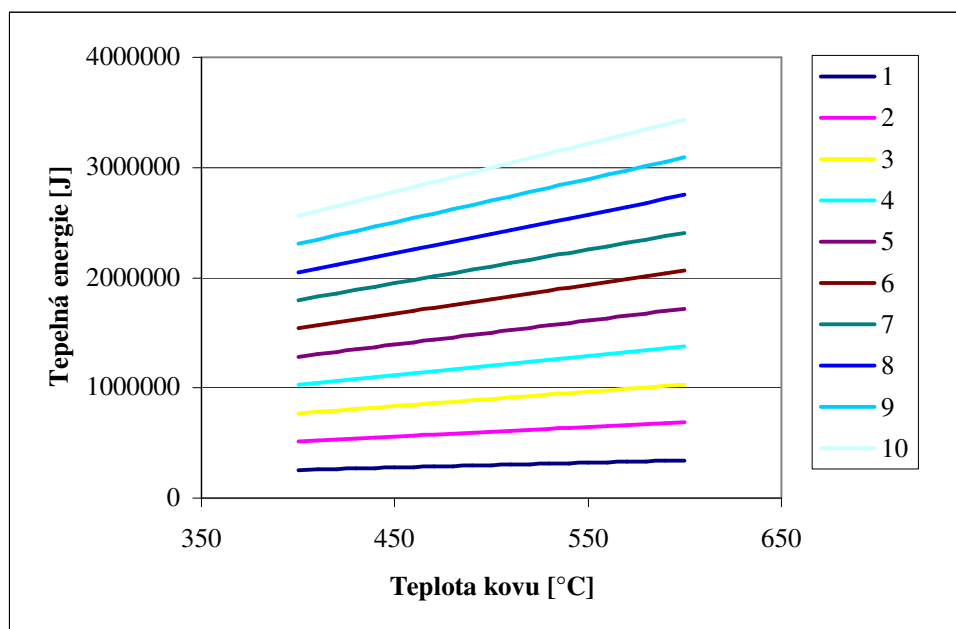
Teplota kovu [°C]	Množství taveniny [kg]									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
420	266982	533963	800944,5	1067926	1334908	1601889	1868871	2135852	2402834	2669815
430	272002	544003	816004,5	1088006	1360008	1632009	1904011	2176012	2448014	2720015
440	277022	554043	831064,5	1108086	1385108	1662129	1939151	2216172	2493194	2770215
450	282042	564083	846124,5	1128166	1410208	1692249	1974291	2256332	2538374	2820415
460	287062	574123	861184,5	1148246	1435308	1722369	2009431	2296492	2583554	2870615
470	292082	584163	876244,5	1168326	1460408	1752489	2044571	2336652	2628734	2920815
480	297102	594203	891304,5	1188406	1485508	1782609	2079711	2376812	2673914	2971015
490	302122	604243	906364,5	1208486	1510608	1812729	2114851	2416972	2719094	3021215
500	307142	614283	921424,5	1228566	1535708	1842849	2149991	2457132	2764274	3071415
510	312162	624323	936484,5	1248646	1560808	1872969	2185131	2497292	2809454	3121615
520	317182	634363	951544,5	1268726	1585908	1903089	2220271	2537452	2854634	3171815
530	322202	644403	966604,5	1288806	1611008	1933209	2255411	2577612	2899814	3222015
540	327222	654443	981664,5	1308886	1636108	1963329	2290551	2617772	2944994	3272215
550	332242	664483	996724,5	1328966	1661208	1993449	2325691	2657932	2990174	3322415
560	337262	674523	1011785	1349046	1686308	2023569	2360831	2698092	3035354	3372615
570	342282	684563	1026845	1369126	1711408	2053689	2395971	2738252	3080534	3422815
580	347302	694603	1041905	1389206	1736508	2083809	2431111	2778412	3125714	3473015
590	352322	704643	1056965	1409286	1761608	2113929	2466251	2818572	3170894	3523215
600	357342	714683	1072025	1429366	1786708	2144049	2501391	2858732	3216074	3573415

**Obr. 5-1 Množství tepla potřebného pro ohřátí různého množství čistého zinku**



Tabulka 5.3 Množství tepla potřebného pro přehřátí 1 až 10 kg slitiny ZnAl4

Teplota kovu [°C]	Množství taveniny [kg]									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
400	256486	512972	769458	1025944	1282430	1538916	1795402	2051888	2308374	2564860
410	260846	521692	782538	1043384	1304230	1565076	1825922	2086768	2347614	2608460
420	265206	530412	795618	1060824	1326030	1591236	1856442	2121648	2386854	2652060
430	269566	539132	808698	1078264	1347830	1617396	1886962	2156528	2426094	2695660
440	273926	547852	821778	1095704	1369630	1643556	1917482	2191408	2465334	2739260
450	278286	556572	834858	1113144	1391430	1669716	1948002	2226288	2504574	2782860
460	282646	565292	847938	1130584	1413230	1695876	1978522	2261168	2543814	2826460
470	287006	574012	861018	1148024	1435030	1722036	2009042	2296048	2583054	2870060
480	291366	582732	874098	1165464	1456830	1748196	2039562	2330928	2622294	2913660
490	295726	591452	887178	1182904	1478630	1774356	2070082	2365808	2661534	2957260
500	300086	600172	900258	1200344	1500430	1800516	2100602	2400688	2700774	3000860
510	304446	608892	913338	1217784	1522230	1826676	2131122	2435568	2740014	3044460
520	308806	617612	926418	1235224	1544030	1852836	2161642	2470448	2779254	3088060
530	313166	626332	939498	1252664	1565830	1878996	2192162	2505328	2818494	3131660
540	317526	635052	952578	1270104	1587630	1905156	2222682	2540208	2857734	3175260
550	321886	643772	965658	1287544	1609430	1931316	2253202	2575088	2896974	3218860
560	326246	652492	978738	1304984	1631230	1957476	2283722	2609968	2936214	3262460
570	330606	661212	991818	1322424	1653030	1983636	2314242	2644848	2975454	3306060
580	334966	669932	1004898	1339864	1674830	2009796	2344762	2679728	3014694	3349660
590	339326	678652	1017978	1357304	1696630	2035956	2375282	2714608	3053934	3393260
600	343686	687372	1031058	1374744	1718430	2062116	2405802	2749488	3093174	3436860

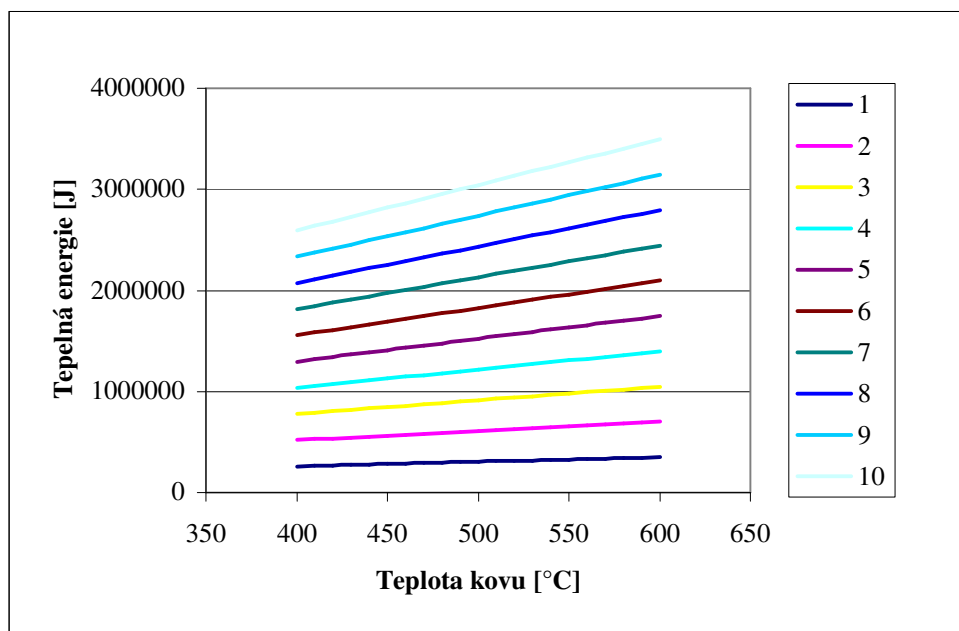


Obr. 5-2 Množství tepla potřebného pro přehřátí různého množství slitiny ZnAl4



Tabulka 5.4 Množství tepla potřebného pro přehřátí 1 až 10 kg slitiny ZnAl4Cu1

Teplota kovu [°C]	Množství taveniny [kg]									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
400	259340	518680	778020	1037360	1296700	1556040	1815380	2074720	2334060	2593400
410	263840	527680	791520	1055360	1319200	1583040	1846880	2110720	2374560	2638400
420	268340	536680	805020	1073360	1341700	1610040	1878380	2146720	2415060	2683400
430	272840	545680	818520	1091360	1364200	1637040	1909880	2182720	2455560	2728400
440	277340	554680	832020	1109360	1386700	1664040	1941380	2218720	2496060	2773400
450	281840	563680	845520	1127360	1409200	1691040	1972880	2254720	2536560	2818400
460	286340	572680	859020	1145360	1431700	1718040	2004380	2290720	2577060	2863400
470	290840	581680	872520	1163360	1454200	1745040	2035880	2326720	2617560	2908400
480	295340	590680	886020	1181360	1476700	1772040	2067380	2362720	2658060	2953400
490	299840	599680	899520	1199360	1499200	1799040	2098880	2398720	2698560	2998400
500	304340	608680	913020	1217360	1521700	1826040	2130380	2434720	2739060	3043400
510	308840	617680	926520	1235360	1544200	1853040	2161880	2470720	2779560	3088400
520	313340	626680	940020	1253360	1566700	1880040	2193380	2506720	2820060	3133400
530	317840	635680	953520	1271360	1589200	1907040	2224880	2542720	2860560	3178400
540	322340	644680	967020	1289360	1611700	1934040	2256380	2578720	2901060	3223400
550	326840	653680	980520	1307360	1634200	1961040	2287880	2614720	2941560	3268400
560	331340	662680	994020	1325360	1656700	1988040	2319380	2650720	2982060	3313400
570	335840	671680	1007520	1343360	1679200	2015040	2350880	2686720	3022560	3358400
580	340340	680680	1021020	1361360	1701700	2042040	2382380	2722720	3063060	3403400
590	344840	689680	1034520	1379360	1724200	2069040	2413880	2758720	3103560	3448400
600	349340	698680	1048020	1397360	1746700	2096040	2445380	2794720	3144060	3493400

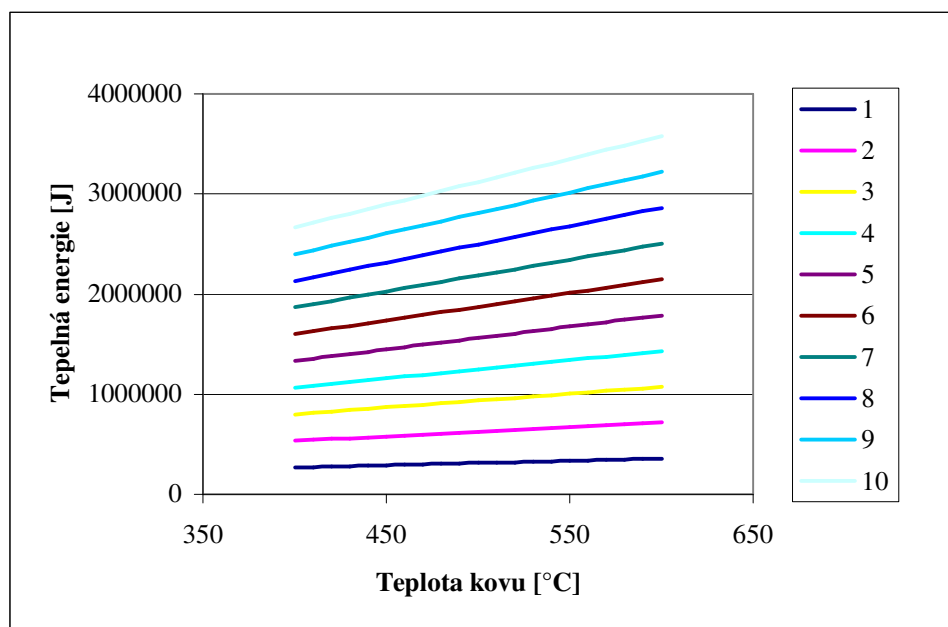


Obr. 5-3 Množství tepla potřebného pro přehřátí různého množství slitiny ZnAl4Cu1



Tabulka 5.5 Množství tepla potřebného pro přehřátí 1 až 10 kg slitiny ZnAl4Cu3

Teplota kovu [°C]	Množství taveniny [kg]									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
400	266690	533380	800070	1066760	1333450	1600140	1866830	2133520	2400210	2666900
410	271240	542480	813720	1084960	1356200	1627440	1898680	2169920	2441160	2712400
420	275790	551580	827370	1103160	1378950	1654740	1930530	2206320	2482110	2757900
430	280340	560680	841020	1121360	1401700	1682040	1962380	2242720	2523060	2803400
440	284890	569780	854670	1139560	1424450	1709340	1994230	2279120	2564010	2848900
450	289440	578880	868320	1157760	1447200	1736640	2026080	2315520	2604960	2894400
460	293990	587980	881970	1175960	1469950	1763940	2057930	2351920	2645910	2939900
470	298540	597080	895620	1194160	1492700	1791240	2089780	2388320	2686860	2985400
480	303090	606180	909270	1212360	1515450	1818540	2121630	2424720	2727810	3030900
490	307640	615280	922920	1230560	1538200	1845840	2153480	2461120	2768760	3076400
500	312190	624380	936570	1248760	1560950	1873140	2185330	2497520	2809710	3121900
510	316740	633480	950220	1266960	1583700	1900440	2217180	2533920	2850660	3167400
520	321290	642580	963870	1285160	1606450	1927740	2249030	2570320	2891610	3212900
530	325840	651680	977520	1303360	1629200	1955040	2280880	2606720	2932560	3258400
540	330390	660780	991170	1321560	1651950	1982340	2312730	2643120	2973510	3303900
550	334940	669880	1004820	1339760	1674700	2009640	2344580	2679520	3014460	3349400
560	339490	678980	1018470	1357960	1697450	2036940	2376430	2715920	3055410	3394900
570	344040	688080	1032120	1376160	1720200	2064240	2408280	2752320	3096360	3440400
580	348590	697180	1045770	1394360	1742950	2091540	2440130	2788720	3137310	3485900
590	353140	706280	1059420	1412560	1765700	2118840	2471980	2825120	3178260	3531400
600	357690	715380	1073070	1430760	1788450	2146140	2503830	2861520	3219210	3576900



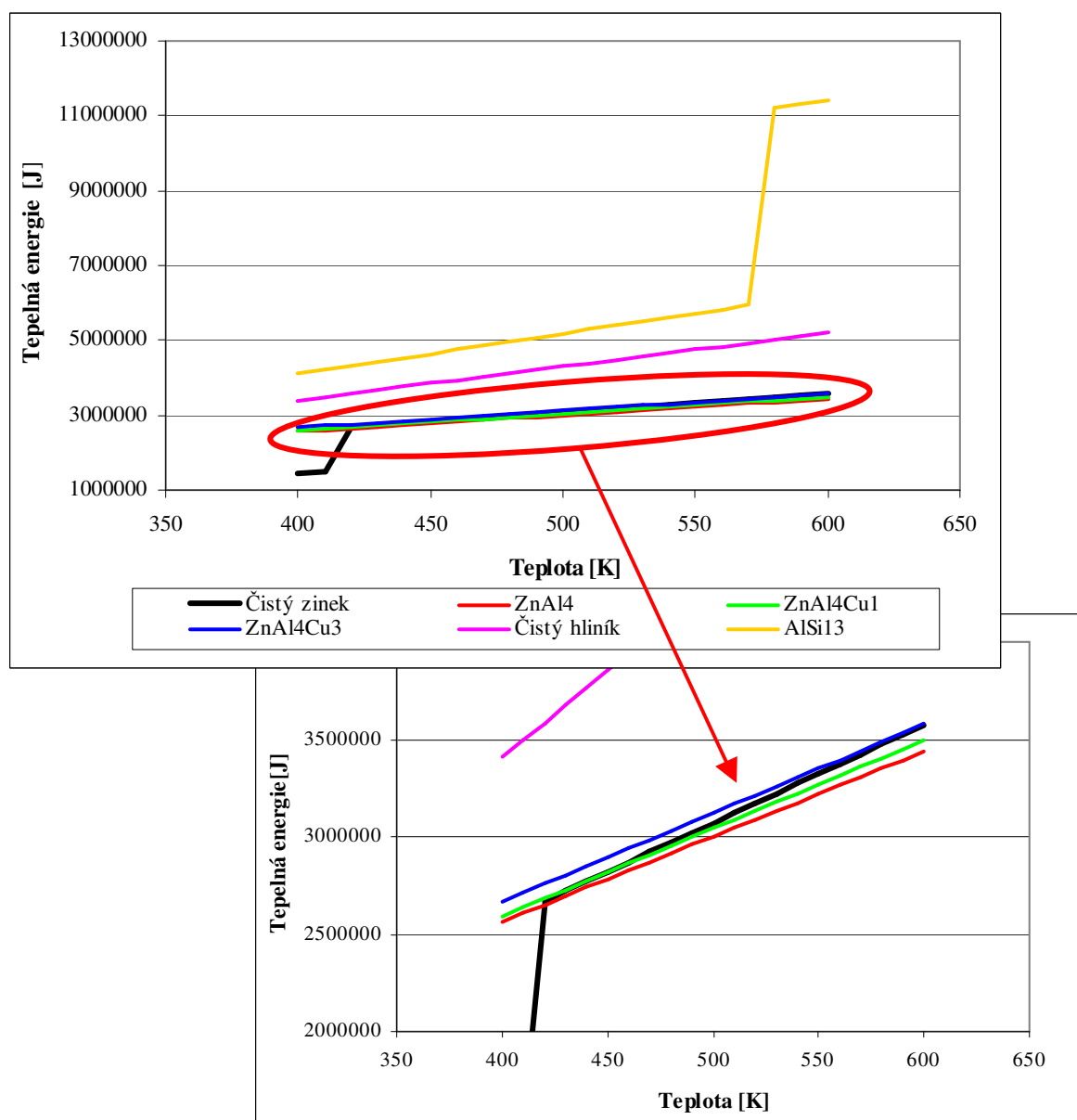
Obr. 5-4 Množství tepla potřebného pro přehřátí různého množství slitiny ZnAl4Cu3



Pro orientaci jsou v tabulce 5.6 uvedeny hodnoty množství tepla potřebného pro přehřátí nebo ohřátí 10 kg různých slévárenských materiálů z neželezných kovů na různé teploty. Na obr. 5-5 je zobrazena grafická závislost těchto hodnot různých slévárenských materiálů.

**Tabulka 5.6 Množství tepla potřebného pro ohřátí 10 kg různých slévárenských materiálů z neželezných kovů**

Teplota kovu [°C]	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3	Čistý hliník	Slitina AlSi13
400	1463000	2564860	2593400	2666900	3404800	4104000
410	1501500	2608460	2638400	2712400	3494400	4212000
420	2669815	2652060	2683400	2757900	3584000	4320000
430	2720015	2695660	2728400	2803400	3673600	4428000
440	2770215	2739260	2773400	2848900	3763200	4536000
450	2820415	2782860	2818400	2894400	3852800	4644000
460	2870615	2826460	2863400	2939900	3942400	4752000
470	2920815	2870060	2908400	2985400	4032000	4860000
480	2971015	2913660	2953400	3030900	4121600	4968000
490	3021215	2957260	2998400	3076400	4211200	5075000
500	3071415	3000860	3043400	3121900	4300800	5184000
510	3121615	3044460	3088400	3167400	4390400	5292000
520	3171815	3088060	3133400	3212900	4480000	5400000
530	3222015	3131660	3178400	3258400	4569600	5508000
540	3272215	3175260	3223400	3303900	4659200	5616000
550	3322415	3218860	3268400	3349400	4748800	5724000
560	3372615	3262460	3313400	3394900	4838400	5832000
570	3422815	3306060	3358400	3440400	4928000	5940000
580	3473015	3349660	3403400	3485900	5017600	11191550
590	3523215	3393260	3448400	3531400	5107200	11304650
600	3573415	3436860	3493400	3576900	5196800	11417750



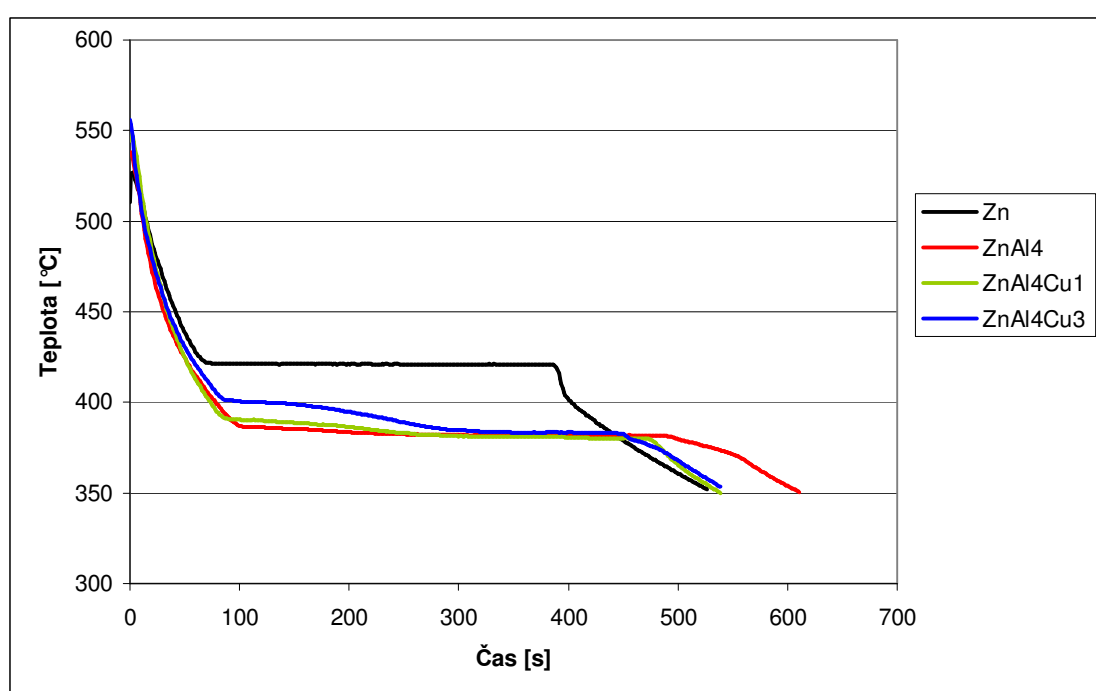
Obr. 5-5 Množství tepla potřebného pro přehřátí 10 kg různých slévarenských materiálů

Při tomto výpočtu byly použity tepelné a fyzikální vlastnosti čistého zinku a slitin zinku získaných z dostupné literatury. Pro orientaci bylo provedeno měření průběhu teploty těchto použitých materiálů v závislosti na čase. Měření teploty bylo provedeno při tuhnutí taveniny v grafitovém kelímku. Naměřený časový průběh teploty čistého zinku a slitin zinku je na obr. 5-6. Z tohoto grafu je možné získat hodnoty potřebných příslušných teplot (teplota likvidu a solidu) pro jednotlivé slitiny zinku a porovnat je s hodnotami získanými z literatury [13]. Naměřené hodnoty teploty počátku a konce tuhnutí zinku a jeho slitin jsou uvedeny tabulce 5.7.



**Tabulka 5.7** Naměřené a tabelované hodnoty, podle [13], teploty likvidu a solidu pro čistý zinek a slitiny zinku

Slitina	Hodnota	Teplota likvidu $T_L$ [°C]	Teplota solidu $T_S$ [°C]
<b>Zn</b>	tabelovaná	419	419
	naměřena	421	421
<b>ZnAl4</b>	tabelovaná	387	382
	naměřena	386	381
<b>ZnAl4Cu1</b>	tabelovaná	386	382
	naměřena	390	381
<b>ZnAl4Cu3</b>	tabelovaná	390	382
	naměřena	401	379



Obr. 5-6 Časový průběh teploty při tuhnutí a chladnutí čistého zinku a jeho slitin

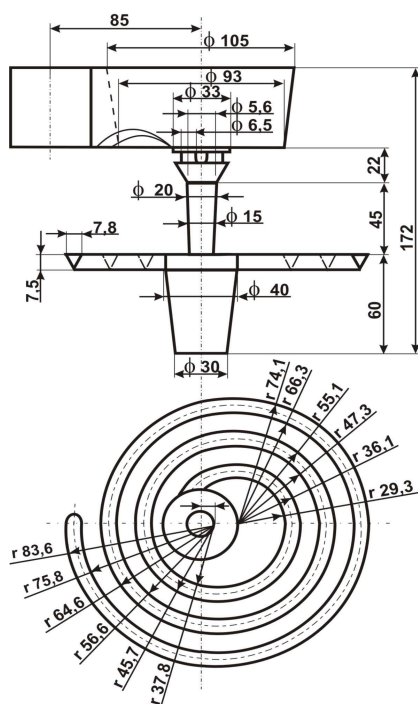
### 5.3 Zabíhavost

Zabíhavost je to schopnost slitiny vyplnit co nejdokonaleji dutinu slévárenské formu. Je závislá na poměru rychlosti pohybu slitiny k rychlosti jejího chladnutí. Zabíhavost ovlivňuje nejen slitina svými fyzikálními vlastnostmi, ale také slévárenská forma.

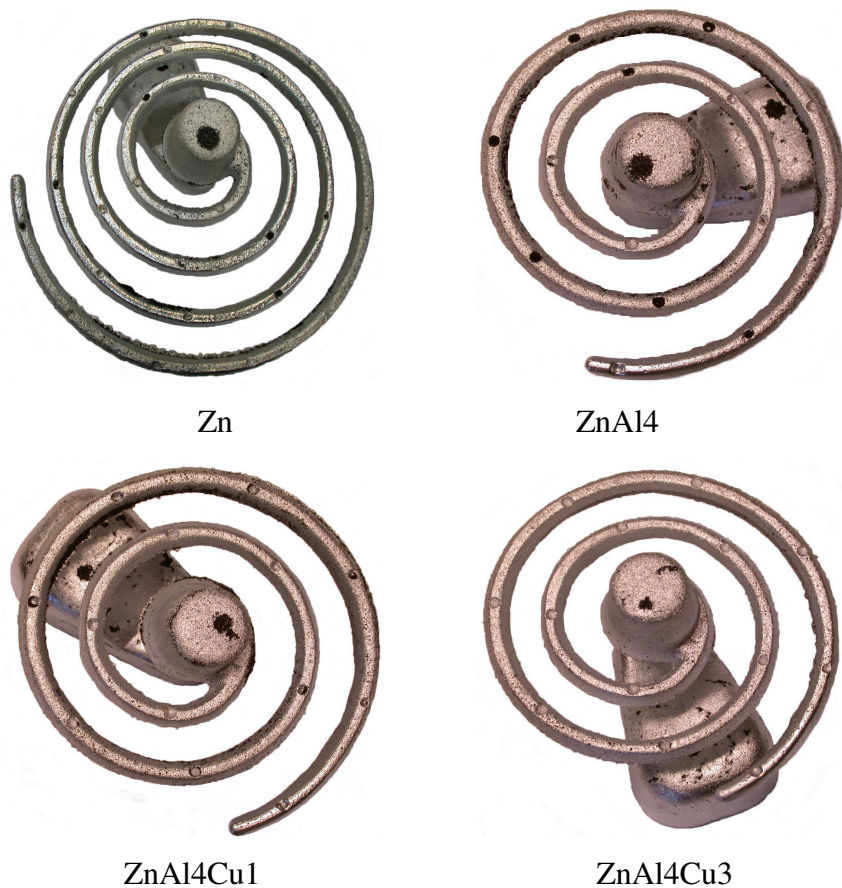
Ke sledování zabíhavosti čistého zinku a jeho slitin byla použita zkouška za použití Curryho spirály (průřez je rovnostranný trojúhelník o délce strany 7,8 mm)

s centrálním vtokem a licí jamkou, která byla zaformovaná do syrové bentonitové formy o velikosti 260 x 260 x 260 mm, viz obr. 5-7.

Ke zkoušce byly použity slévárenské materiály popsané ve výše uvedené kapitole 5.1, tavenina byla odlévána při teplotách 420, 450, 480, 510 a 550 °C. Použité slitiny zinku byly taveny v odporové peci. Před odléváním tavenina byla zbavena strusky a po změření teploty (digitální termomether GTH 1150 - made in Germany) odlita do připravené formy. Bylo dbáno, aby doba lití nepřesáhla 5 s. Na obr. 5.8 jsou odlitky spirál získané při odlévání čistého zinku a slitin zinku z teploty 450 °C, v příloze č. 9 jsou zobrazeny odlitky spirál získané při dalších teplotách. Naměřené hodnoty zabíhavosti jsou uvedeny v příloze č. 10. Pro celkové vyhodnocení naměřených hodnot byly použity statistické výpočty, viz příloha č. 11.



Obr. 5-7 Schéma Curryho spirály včetně rozměrů

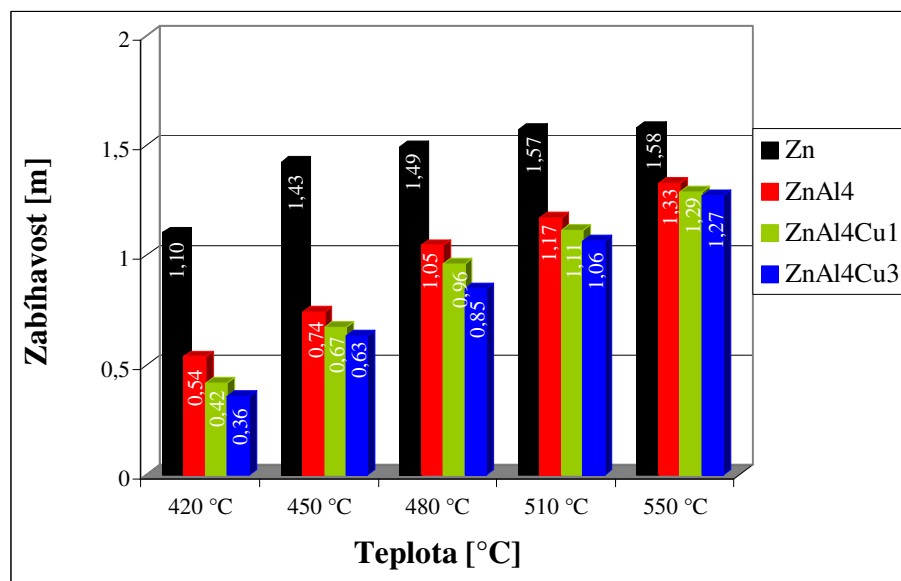


Obr. 5-8 Odlitky spirály získané odléváním čistého zinku a slitin zinku při teplotě 450 °C

V tabulce 5.8 jsou uvedeny průměrné hodnoty zabíhavosti čistého zinku a jeho slitin při použitých teplotách lití. Na obr. 5-9 je uvedeno grafické vyjádření zabíhavosti v souvislosti s použitou teplotou lití.

**Tabulka 5.8 Průměrné hodnoty zabíhavosti čistého zinku a jeho slitin při použitých teplotách lití**

Teplota lití [°C]	Zabíhavost [m]			
	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
420 °C	1,103	0,539	0,420	0,358
450 °C	1,425	0,742	0,672	0,633
480 °C	1,493	1,046	0,960	0,847
510 °C	1,571	1,172	1,113	1,064
550 °C	1,580	1,327	1,290	1,272

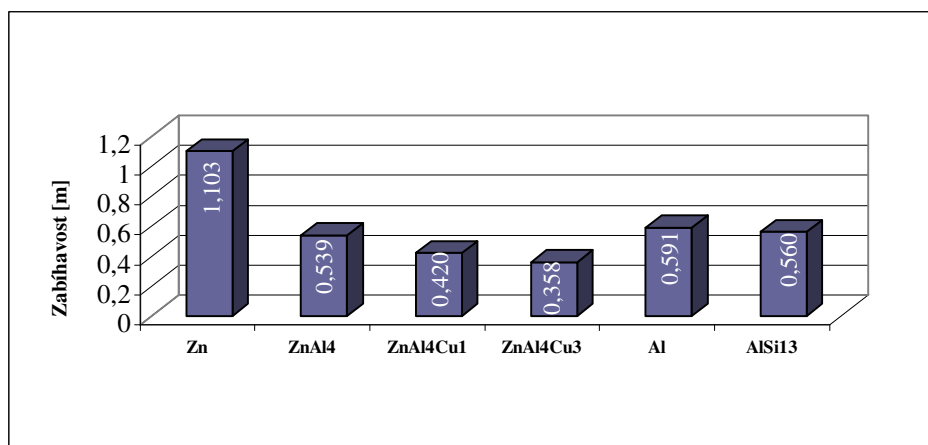


Obr. 5-9 Grafické znázornění průměrných hodnot zabíhavosti čistého zinku a slitin zinku při různých teplotách odlévání

Pro porovnání je uvedena zabíhavost čistého zinku, slitin zinku a čistého hliníku a velmi používané slévárenské slitiny AlSi13. Tato zabíhavost byla provedena v rámci řešení této disertační práce, teplota lití zinku a jeho slitin byla volena 430 °C, to je teplota blízká teplotě tání čistého zinku. Pro čistý hliník a slitinu AlSi13 byla volena teplota lití 670 °C, ta je o málo vyšší než teplota tání čistého hliníku. V tabulce 5.9 jsou uvedeny naměřené hodnoty zabíhavosti používaných slévárenských materiálů a grafické vyjádření zabíhavosti je na obr. 5.10.

**Tabulka 5.9 Hodnoty zabíhavosti používaných slévárenských materiálů z neželezných kovů**

Slévárenský materiál	Teplota lití [°C]	Zabíhavost [m]
<b>Zn</b>	430	1,103
<b>ZnAl4</b>	430	0,539
<b>ZnAl4Cu1</b>	430	0,420
<b>ZnAl4Cu3</b>	430	0,358
<b>Al</b>	670	0,591
<b>AlSi13</b>	670	0,560



Obr. 5-10 Grafické znázornění zabíhavosti vybraných slévárenských slitin z neželezných kovů

Z výše uvedených výsledků je zřejmé, že čistý zinek díky vysoké hustotě vykazuje nejvyšší hodnotu zabíhavosti. Naopak zabíhavost slitiny AlSi13 je dosti nízká, k nízké hodnotě zabíhavosti přispívá dlouhá doba lití, nevhodně metalurgicky ošetřená slitina hliníku, atd.

## 5.4 Sledování průběhu a doby tuhnutí odlitků

Proces tuhnutí odlitků je jedním z rozhodujících dějů při výrobě odlitků. Mírou procesu tuhnutí je rychlost tuhnutí, tu je možno posuzovat podle tloušťky ztuhlé vrstvy odlitku. Odvození vztahu pro určení ztuhlé vrstvy odlitku v určitém časovém okamžiku vychází z porovnání tepelných toků, které uvolní vrstvička kovu  $\xi$  při svém ztuhnutí a tepelného toku, který projde ztuhlou vrstvou materiálu na základě jeho tepelné vodivosti:

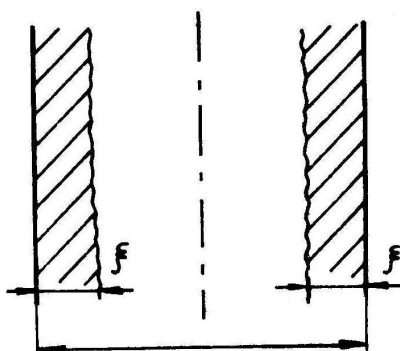
$$L \cdot \rho_M \cdot \frac{d\xi}{dt} = -\lambda_M \cdot \frac{dT_M}{dx} \quad (5.2)$$

Integrací této rovnice lze získat vztah pro výpočet ztuhlé vrstvy odlitku  $\xi$ . Na obr. 5-11 je uvedeno schéma vzniku ztuhlé vrstvy  $\xi$  odlitku ve formě v určitém časovém okamžiku.

Jak je obecně známo, problematikou tuhnutí odlitku se zabýval CHVORINOV, který odvodil vztah pro výpočet ztuhlé vrstvy odlitku ( $\xi$ ) tvaru desky.:

$$\xi = k \cdot \sqrt{t}, \quad (5.3)$$

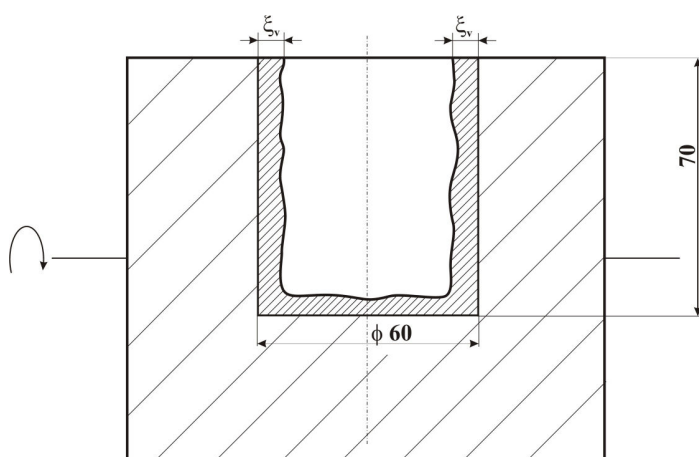
kde značí:  $k$  - konstantu tuhnutí [ $\text{m.s}^{-1/2}$ ];  
 $t$  - dobu tuhnutí odlitku [s].



Obr. 5-11 Schéma ztuhlé vrstvy ( $\xi$ ) odlitku

Jak je z rovnice (5.3) je zřejmé, důležitou veličinou pro posouzení tuhnutí odlitků je konstanta tuhnutí  $k$ . V příloze č. 12 jsou pro porovnání uvedeny hodnoty konstanty tuhnutí  $k$  pro různé slévárenské materiály odlévané do příslušných forem uváděné v odborné literatuře [41].

Ke stanovení konstanty tuhnutí  $k$  při odlévání a tuhnutí čistého zinku a slitin zinku do formy byl použit odlitek tvaru válce o rozměrech  $\varnothing 60 \times 70$  mm. Stanovení konstanty tuhnutí bylo provedeno na základě tzv. vylévací zkoušky, schéma je na obr. 5-12.



Obr. 5-12 Schéma vylévací zkoušky pro odlitek tvaru válce  $\varnothing 60 \times 70$  mm



Do dutiny připravené slévárenské formy byla nalita tavenina příslušné slitiny zinku o teplotě 550 °C a pak byla sledována doba tuhnutí odlitku v časových okamžicích 0, 15, 30, 45, 50, 55 [s]. To znamená, že v těchto časových okamžicích byla vždy forma s tuhnoucí taveninou převrácena o 180° a neztuhlá tavenina byla vylita. V dutině formy zbyl vždy jen skelet o příslušné tloušťce ztuhlé vrstvy odpovídající jednotlivým časovým okamžikům. K těmto jednotlivým časům byly zjištěny příslušné tloušťky ztuhlé vrstvy odlitku. Tato zkouška byla provedena do dvou různých typů slévárenských forem. V prvním případě byla použita kovová forma, která při zkoušce měla různé počáteční teploty a to 20 °C a 200 °C. V druhém případě byla použita forma z CT směsi. V tabulkách 5.10, 5.11 a 5.12 jsou uvedeny průměrné hodnoty ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce Ø60 x 70 mm pro jednotlivé časové okamžiky, jednotlivé druhy forem, jednotlivé počáteční teploty kovové formy a použité slévárenské materiály - čistý zinek a slitiny zinku. Obr. 5-13 graficky zobrazuje tyto získané hodnoty. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 13. Pro celkové vyhodnocení naměřených hodnot byly použity statistické výpočty, které jsou uvedeny v příloze č. 11.

**Tabulka 5.10 Průměrné hodnoty tloušťky ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce z čistého zinku a slitin zinku v ocelové formě,  $T_F = 20\text{ °C}$**

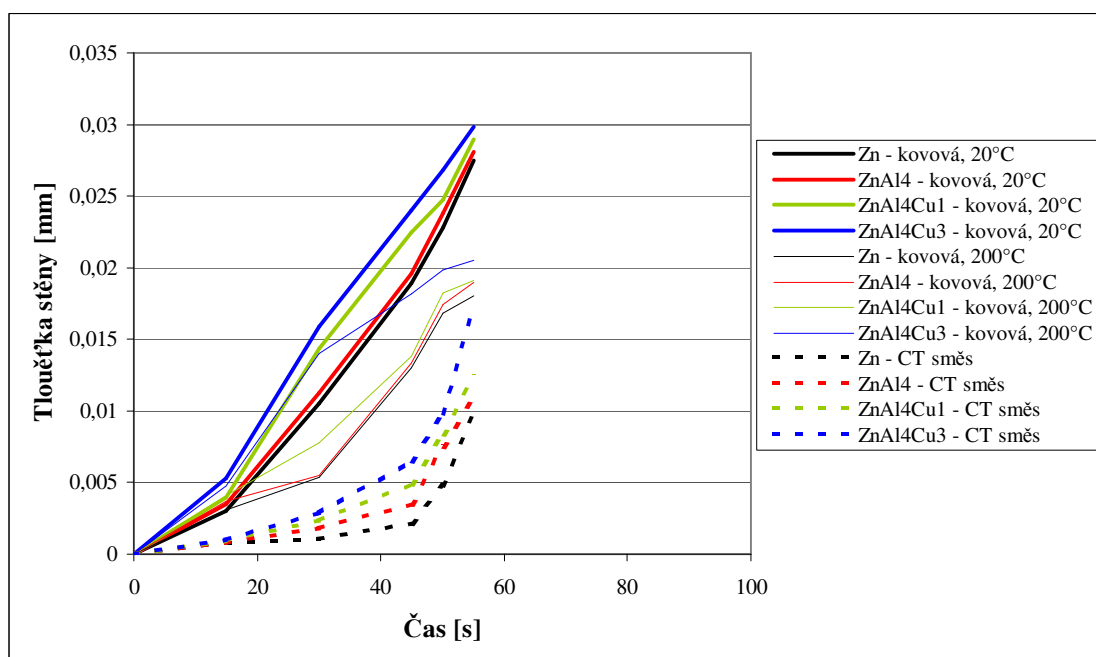
Čas tuhnutí [s]	Tloušťka ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce Ø 60 x 70 [m]			
	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
0	0	0	0	0
15	0,003	0,00349	0,00393	0,00533
30	0,0105	0,01127	0,01433	0,01590
45	0,0189	0,01961	0,02245	0,02400
50	0,0228	0,02379	0,02477	0,02680
55	0,0275	0,02812	0,02899	0,02987

**Tabulka 5.11 Průměrné hodnoty tloušťky ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce z čistého zinku a slitin zinku v ocelové formě,  $T_F = 200\text{ °C}$**

Čas tuhnutí [s]	Tloušťka ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce Ø 60 x 70 [m]			
	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
0	0	0	0	0
15	0,00306	0,00366	0,00411	0,00475
30	0,00539	0,00551	0,00776	0,01403
45	0,01301	0,01334	0,01383	0,01819
50	0,01684	0,01746	0,01824	0,01988
55	0,01801	0,01897	0,01908	0,0205

**Tabulka 5.12 Průměrné hodnoty tloušťky ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce z čistého zinku a slitin zinku ve formě z CT směsi**

Čas tuhnutí [s]	Tloušťka ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce Ø 60 x 70 [m]			
	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
0	0	0	0	0
15	0,00078	0,00081	0,00094	0,00099
30	0,00105	0,00184	0,00236	0,00287
45	0,00214	0,0035	0,0049	0,0065
50	0,00475	0,00752	0,0084	0,0098
55	0,0098	0,0109	0,0124	0,0173



Obr. 5-13 Graf průměrných hodnot tloušťek ztuhlé vrstvy odlitku z čistého zinku a slitin zinku v závislosti na čase tuhnutí při teplotách formy 20 °C a 200 °C

Na základě naměřených tloušťek ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce ( $\xi_v$ ) z čistého zinku odlitého při počáteční teplotě formy 20 °C, viz odpovídající tabulka, byl proveden přepočet na tloušťku ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru desky ( $\xi_D$ ) podle vztahu:

$$\xi_D = \xi_v \cdot \left(1 - \frac{\xi_v}{D}\right) \quad (5.4)$$

kde značí:  $\xi_v$  - ztuhlá tloušťka stěny odlitku tvaru válce Ø D [mm];

D - Ø odlitku tvaru válce (Ø D = 60 mm).





Hodnota ( $\xi_D$ ) spolu s příslušnou hodnotou času byla dosazena do známého vztahu (5.3), respektive do rovnice vyjádřené ve tvaru:

$$k = \frac{\xi_D}{\sqrt{t}} \quad (5.5)$$

Tím byly získány pro příslušnou skupinu experimentů různé hodnoty konstant tuhnutí ( $k_1, k_2, \dots, k_n$ ), které jsou uvedeny v příslušných tabulkách. Na základě těchto hodnot byla stanovena střední hodnota konstanty tuhnutí. V tabulkách 5.13, 5.14, 5.15 a 5.16 jsou uvedeny přepočty ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce ( $\xi_v$ ) na odlitek tvaru desky ( $\xi_D$ ) pro jednotlivé použité materiály (Zn, ZnAl4, ZnAl4Cu1 a ZnAl4Cu3) a jednotlivé typy použitých slévárenských forem (kovová, CT směs) a příslušnou počáteční teplotu.

**Tabulka 5.13 Přepočet tloušťky ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce na odlitek tvaru desky z čistého zinku**

Čas tuhnutí [s]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce $\xi_v$ [m]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru desky $\xi_d$ [m]	$K_i = \frac{\xi_{d_i}}{\sqrt{t_i}}$	$\overline{K} = \frac{\Sigma K_i}{n} \cdot 10^{-3} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1/2}]$
	Kovová forma s $T_F = 20^\circ \text{C}$			
0	0	0	0	2,07
15	0,0030	0,00299	0,00077	
30	0,0105	0,01049	0,00192	
45	0,0189	0,01889	0,00282	
50	0,0228	0,02279	0,00322	
55	0,0275	0,02748	0,00371	
Kovová forma s $T_F = 200^\circ \text{C}$				
0	0	0	0	1,42
15	0,00306	0,00305	0,00079	
30	0,00539	0,00538	0,00098	
45	0,01301	0,01300	0,00194	
50	0,01684	0,01683	0,00238	
55	0,01801	0,01800	0,00243	
Forma z CT směsi				
0	0	0	0	0,45
15	0,00078	0,00077	0,000201	
30	0,00105	0,00104	0,000192	
45	0,00214	0,00213	0,000319	
50	0,00475	0,00474	0,000672	
55	0,01801	0,01800	0,002430	

**Tabulka 5.14 Přepočet tloušťky ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce na odlitek tvaru desky ze slitiny ZnAl4**

Čas tuhnutí [s]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce $\xi_v$ [m]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru desky $\xi_d$ [m]	$K_i = \frac{\xi_{d_i}}{\sqrt{t_i}}$	$\overline{K} = \frac{\Sigma K_i}{n} .10^{-3} \text{ [m} .s^{-1/2}]$
	Kovová forma s T <sub>F</sub> = 20 °C			
0	0	0	0	2,17
15	0,00349	0,00348	0,0009	
30	0,01127	0,01126	0,00206	
45	0,01961	0,01960	0,00292	
50	0,02379	0,02378	0,00336	
55	0,02812	0,02810	0,00379	
Kovová forma s T <sub>F</sub> = 200 °C				
0	0	0	0	1,49
15	0,00366	0,00365	0,00094	
30	0,00551	0,00550	0,00100	
45	0,01334	0,01333	0,00199	
50	0,01746	0,01745	0,00247	
55	0,01897	0,01896	0,00256	
Forma z CT směsi				
0	0	0	0	0,649
15	0,00081	0,00080	0,000209	
30	0,00184	0,00183	0,000336	
45	0,00350	0,00349	0,000522	
50	0,00752	0,00751	0,001063	
55	0,01090	0,01080	0,001469	

**Tabulka 5.15 Přepočet tloušťky ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce na odlitek tvaru desky ze slitiny ZnAl4Cu1**

Čas tuhnutí [s]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce $\xi_v$ [m]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru desky $\xi_d$ [m]	$K_i = \frac{\xi_{d_i}}{\sqrt{t_i}}$	$\overline{K} = \frac{\Sigma K_i}{n} \cdot 10^{-3} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1/2}]$
	Kovová forma s T <sub>F</sub> = 20 °C			
0	0	0	0	2,39
15	0,00393	0,00392	0,00101	
30	0,01433	0,01432	0,00261	
45	0,02245	0,02244	0,00335	
50	0,02477	0,02475	0,00350	
55	0,02899	0,02897	0,00391	
	Kovová forma s T <sub>F</sub> = 200 °C			
0	0	0	0	1,61
15	0,00411	0,00410	0,00106	
30	0,00776	0,00775	0,00141	
45	0,01383	0,01382	0,00206	
50	0,01824	0,01823	0,00258	
55	0,01908	0,01907	0,00257	



Tabulka 5.15 - pokračování

Čas tuhnutí [s]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce $\xi_v$ [m]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru desky $\xi_d$ [m]	$K_i = \frac{\xi_{d_i}}{\sqrt{t_i}}$	$\bar{K} = \frac{\Sigma K_i}{n} \cdot 10^{-3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}]$
	Forma z CT směsi			
0	0	0	0	0,71
15	0,00094	0,00093	0,000243	
30	0,00236	0,00235	0,000431	
45	0,00490	0,00480	0,000730	
50	0,00840	0,00830	0,001188	
55	0,01240	0,01230	0,001672	

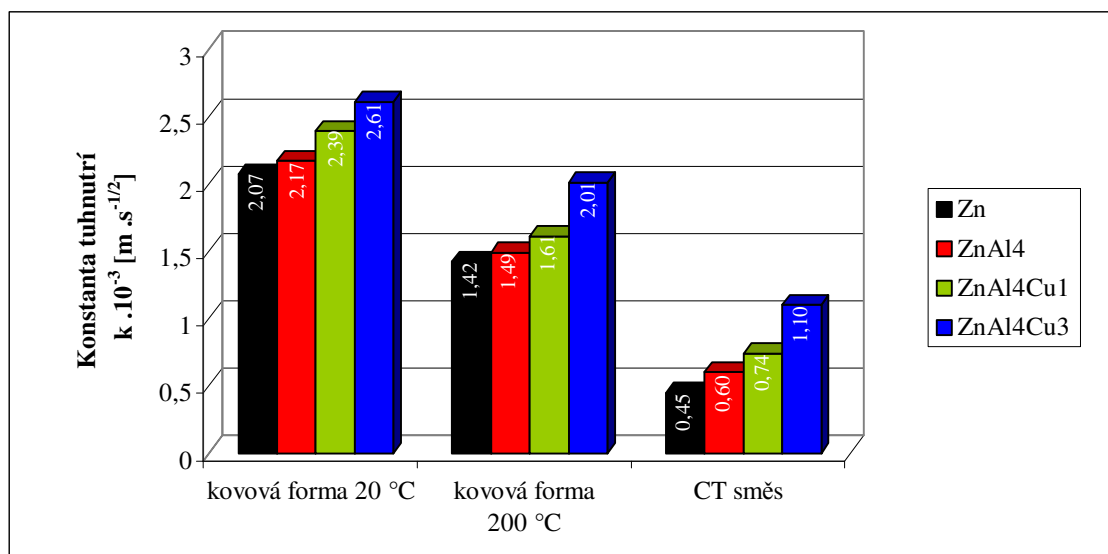
Tabulka 5.16 Přepočet tloušťky ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce na odlitek tvaru desky ze slitiny ZnAl4Cu3

Čas tuhnutí [s]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce $\xi_v$ [m]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru desky $\xi_d$ [m]	$K_i = \frac{\xi_{d_i}}{\sqrt{t_i}}$	$\overline{K} = \frac{\Sigma K_i}{n} \cdot 10^{-3} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1/2}]$
	Kovová forma s T <sub>F</sub> = 20 °C			
0	0	0	0	2,61
15	0,00533	0,00532	0,00137	
30	0,01590	0,01589	0,00290	
45	0,02400	0,02399	0,00358	
50	0,02680	0,02678	0,00379	
55	0,02987	0,02985	0,00402	
	Kovová forma s T <sub>F</sub> = 200 °C			
0	0	0	0	2,01
15	0,00476	0,00475	0,00123	
30	0,01404	0,01403	0,00256	
45	0,01820	0,01819	0,00271	
50	0,01989	0,01988	0,00281	
55	0,02051	0,02050	0,00276	
	Forma z CT směsi			
0	0	0	0	0,91
15	0,00099	0,00098	0,002556	
30	0,00287	0,00286	0,000469	
45	0,00650	0,00640	0,000820	
50	0,00980	0,00970	0,001258	
55	0,01730	0,01720	0,001820	

Tabulka 5-17 shrnuje získané hodnoty konstant tuhnutí  $k$  pro čistý zinek a slitiny zinku pro jednotlivé druhy použitých slévárenských forem a příslušnou počáteční teplotu kovové formy  $20^\circ \text{C}$  a  $200^\circ \text{C}$ . Na obr. 5-14 je graficky znázorněna konstanta tuhnutí  $k$  pro čistý zinek a slitiny zinku.

**Tabulka 5.17 Průměrná hodnota konstanty tuhnutí  $k$  pro jednotlivé použité materiály a jednotlivé typy slévarenských forem a jejich počáteční teplotu pro odlitek tvaru desky**

Druh a počáteční teplota formy	Konstanta tuhnutí $k \cdot 10^{-3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}]$			
	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
Kovová, $T_F = 20^\circ\text{C}$	2,07	2,17	2,39	2,61
Kovová, $T_F = 200^\circ\text{C}$	1,42	1,49	1,61	2,01
CT směs	0,45	0,60	0,71	0,91



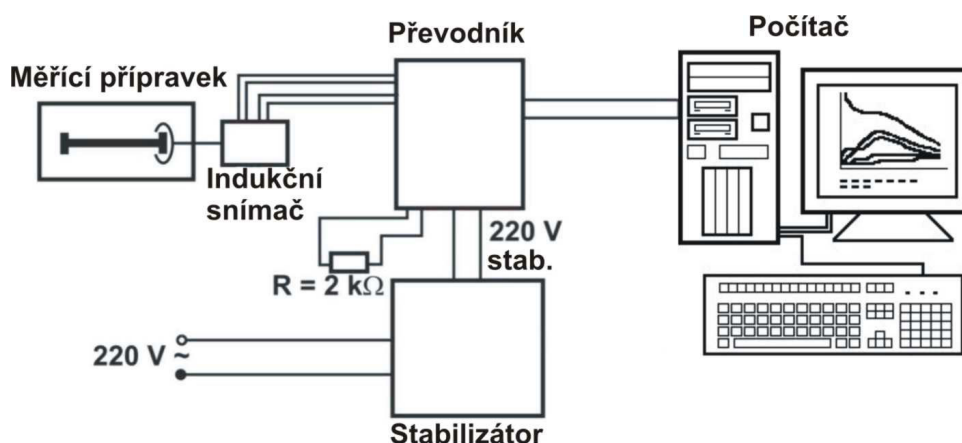
Obr. 5-14 Konstanta tuhnutí  $k$  pro odlitek tvaru desky z čistého zinku a slitin zinku; odléváno do různých typů forem

## 5.5 Sledování náchylnosti na vznik trhlin

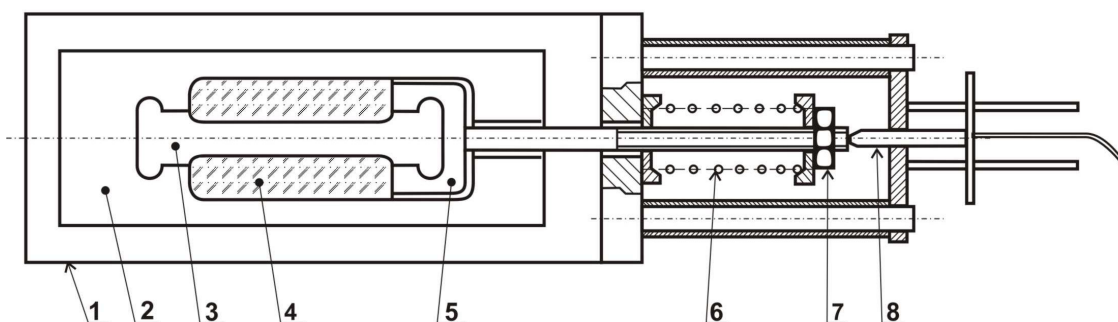
Ke sledování náchylnosti na vznik trhlin odlitků z čistého zinku a slitin zinku bylo použito zkušebního zařízení, resp. speciálně vyrobený rám s dutinou kombinované formy pro odlitek tvaru I podle BOČVARA a SVIDERSKÉHO, u kterého byla v rámci mé doktorské práce provedena konstrukční úprava pro vyvozování bržděného smršťování odlitku. Současně bylo připojeno čidlo pro snímání změny polohy, převodník, resp. dilatometr a celá tato soustava byla propojena s PC. Digitalizovaný signál změny polohy byl registrován počítačem a zobrazován jeho monitorem. Na zkušebním zařízení byla místo závaží použita tlačná pružina, která dovoluje vyvodit maximální sílu 400 [N]. Tak bylo sestaveno nové měřicí zařízení s dilatometrem a počítačem a doplněno stabilizátorem elektrického napětí. Toto zařízení umožňuje nastavení určité síly, která může vyvolat až bržděné smršťování tuhnuícího odlitku. To

může způsobit i jeho porušení. Zařízením lze také zaznamenávat časovou závislost lineárního smršťování tohoto specifického tvaru odlitku při jeho chladnutí.

Skupinové schéma tohoto zařízení je uvedeno na obr. 5-15. Z tohoto obrázku je patrný i tvar zkušební odlitku I (tzv. „piškot“). Na obr. 5-16 je schéma a na obr. 5-17 je měřicí rám s dutinou pro odlitek. Dutina formy je otevřená, skládá se ze tří částí. Pevné kovové části, pak následuje 108 mm dlouhá písková část, ve které je zaformován obdélníkový dírk zkušební tělíska, který má rozměr 25 x 11 mm. Písková část umožňuje vytvoření tzv. tepelné zóny odlitku, v tomto místě tuhne odlitek naposledy. Poslední část je kovová a ještě pohyblivá. Pohyblivá část je táhlem spojena s nastavitelnými pružinami pro vyvození tahové síly.

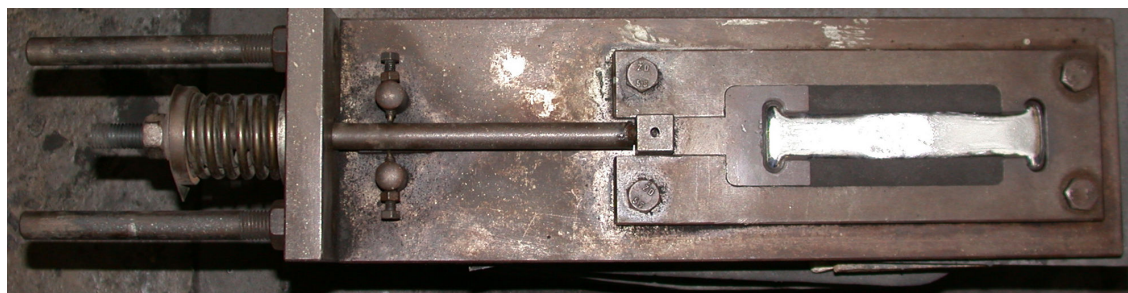


Obr. 5-15 Blokové schéma měřícího zařízení podle Bočvara a Sviderského pro sledování brzděného smršťování a stabilizátoru, převodníku a PC



1 - rám; 2 - kovová deska; 3 - dutina pro odlitek; 4 - část dutiny s pískovou směsí; 5 - pohyblivá kovová tvarová deska; 6 - tlačná pružina; 7 - matice; 8 - měřicí čidlo dilatace

Obr. 5-16 Schéma měřícího zařízení podle Bočvara a Sviderského



Obr. 5-17 Zkušební zařízení (rám s dutinou formy) dle Bočvara a Sviderského

Do dutiny tohoto měřicího zařízení byly postupně nality taveniny čistého zinku a slitin zinku (ZnAl4, ZnAl4Cu1 a ZnAl4Cu3). Tyto materiály tuhly za různých hodnot vyvozené tahové (brzdící) síly. Na odlitcích byly sledovány podmínky pro vznik trhlin. Pro každý typ experimentu byla provedena tři odlití. Přehled získaných výsledků je uveden v následující tabulce 5.18.

**Tabulka 5.18 Přehled podmínek pro vznik trhlin tuhnoucího zkušebního odlitku**

Použité slitiny zinku	Hodnota tahového předpětí [MPa]			
	0,36	0,73	1,09	1,45
<b>Zn (99.6%)</b>	nevznikly	nevznikly	nevznikly	náznak porušení
<b>ZnAl4</b>	nevznikly	nevznikly	nevznikly	nevznikly
<b>ZnAl4Cu1</b>	nevznikly	nevznikly	nevznikly	nevznikly
<b>ZnAl4Cu3</b>	nevznikly	nevznikly	nevznikly	nevznikly

**Poznámka:** Toto konstatování je uvedeno na základě tří odlití pro každý typ experimentu. Pro experimenty byla použita tahová síla 100; 200; 300; 400 [N]. Plocha zkušebního tělíska v místě působící síly je  $S = 275 \text{ mm}^2$ .

Další měření provedené v rámci této zkoušky bylo stanovení brzděného napětí zkušebních odlitků z čistého zinku. Zde byla sledována velikost brzděného napětí u zkušebních odlitků jejichž rozměr středové části se měnil. V tabulce 5.19 jsou uvedeny rozměry jednotlivých zkušebních odlitků a k nim stanovené výsledné brzděné napětí. Na obr. 5-18 jsou zobrazeny získané zkušební odlitky. Zde je vidět, při které tloušťce střední části zkušební odlitku došlo k jeho poškození.

Na tomto měřicím zařízení byla také sledována velikost smrštění čistého zinku a slitin zinku, jak při brzděném, tak i volném smršťování zkušební odlitku. Při brzděném smršťování zkušební odlitku jsem se zaměřila již jen na experimenty,



při nichž bylo vyvozeno předpětí 1,45 [MPa]. Naměřené maximální hodnoty při bržděném a volném smršťování jsou vztaženy k teplotě odlitku 550 °C jsou uvedeny v tabulce 5.20.

**Tabulka 5.19 Stanovení napětí při bržděném smršťování tuhnutí odlitku**

Stanovení napětí při bržděném smršťování tuhnutí odlitku z čistého zinku (síla = 400 N)					
Vzorek (řazeno podle obr. 5-18, shora)	Rozměr a [mm]	Rozměr b [mm]	Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Napětí [MPa]	Porušení zkušebního odlitku
1.	11,38	12,8	145,2	2,8	nepoškozen
2.	8,1	12,3	99,4	4,0	malý náznak trhlin
3.	7,0	11,2	78,3	5,1	viditelné trhliny
4.	4,29	10,3	44,1	9,0	porušení souvislosti



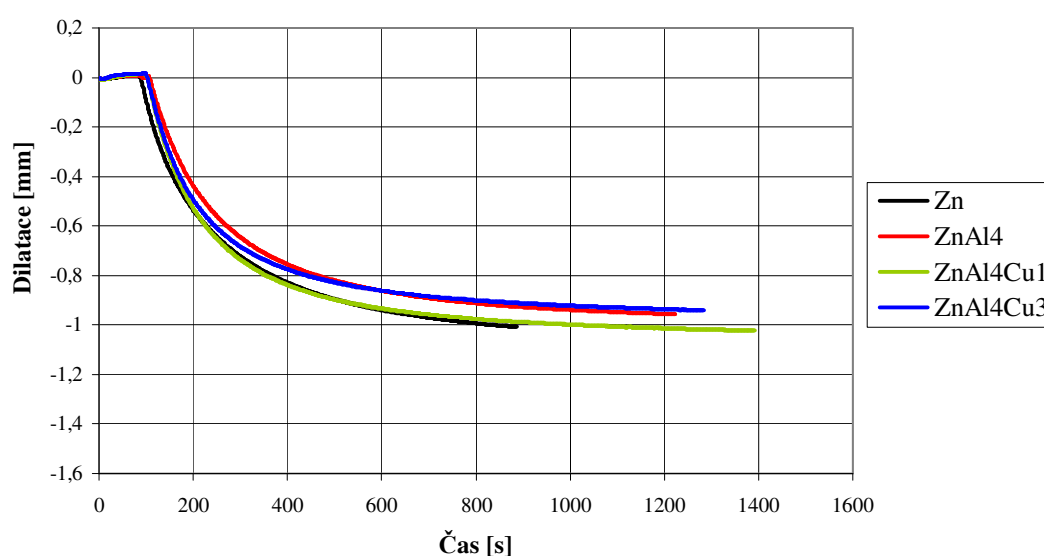
Obr. 5-18 Porušení zkušebních odlitků při bržděném smršťování

Na obr. 5-19 je uvedena grafická závislost velikosti lineárního smrštění čistého zinku a slitin zinku na čase. Sledování velikosti smrštění při bržděném smršťování zkušebního odlitku bylo provedeno při teplotě lité 550 °C a velikost smrštění při volném smršťování byla zjišťována při teplotách lité 450 °C a 550 °C.

**Tabulka 5.20** Hodnoty maximálního lineárního smrštění čistého zinku a slitin zinku při podmínkách brzděného smršťování

Použité slévarenské materiály	Maximální hodnota lineárního smrštění [mm] (teplota lití 550 °C)
Zn (99.6%)	-1,0077
ZnAl4	-0,9571
ZnAl4Cu1	-1,0228
ZnAl4Cu3	-0,9415

**Poznámka:** Hodnota tahového předpětí byla 1,45 [MPa]. Záporná hodnota lineárního smrštění značí, že došlo ke smrštění odlitku. Pokud by byla hodnota kladná, došlo by k roztažení odlitku.



Obr. 5-19 Grafické závislosti lineárního smrštění zkušebních odlitků z čistého zinku a slitin zinku na teplotě



šířka bočních částí - 40 mm; šířka dříku 25 mm; výška dříku 11 mm; délka zkušebního tělíska 158 mm

Obr. 5-20 Typ zkušebních odlitků, na kterých bylo prováděno měření brzděného smrštění



## 5.6 Sledování lineárního smršťování odlitků tvaru I bez předpětí

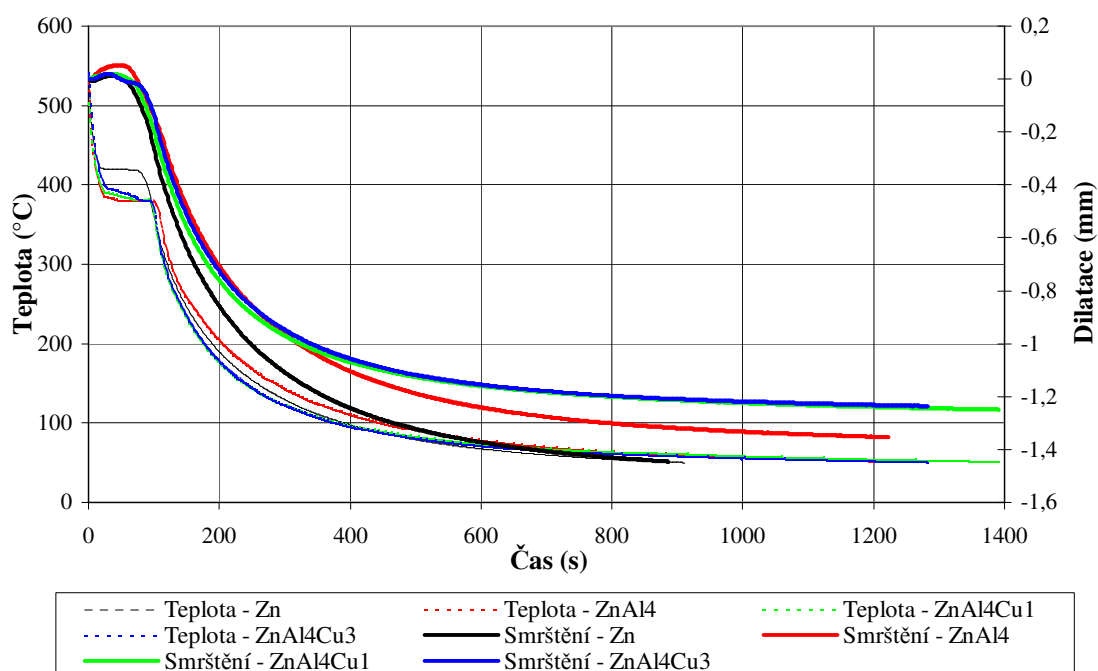
Na výše uvedeném zkušebním zařízení (obr. 5-15 až obr. 5-17) bylo provedeno také sledování časového průběhu volného smršťování zkušebního odlitku tvaru I bez předpětí z čistého zinku a slitin zinku. Experimenty byly prováděny při teplotě lité 450 a 550 °C. Výsledné hodnoty smrštění vztažené k teplotě 50 °C jsou uvedeny v tabulce 5.21 a časové závislosti smrštění jsou na obr. 5-21 a 5-22.

**Tabulka 5.21 Průměrné hodnoty lineárního smrštění zkušebního odlitku tvaru I čistého zinku a slitin zinku**

Použité slévarenské materiály	Maximální hodnota lineárního smrštění [mm]	
	teplota odlévání 450 °C	teplota odlévání 550 °C
Zn (99,6%)	-1,3807	-1,4489
ZnAl4	-1,3013	-1,3571
ZnAl4Cu1	-1,3145	-1,2507
ZnAl4Cu3	-1,2782	-1,2367

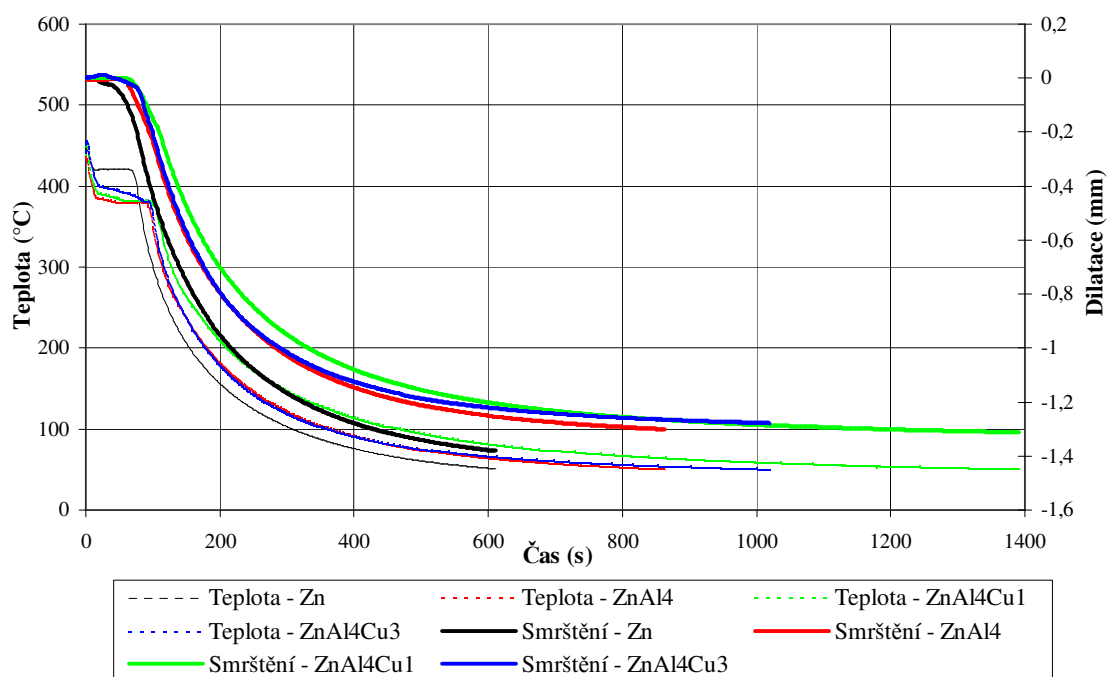
**Poznámka:** Záporná hodnota lineárního smrštění značí, že došlo ke smrštění odlitku. Pokud by byla hodnota kladná, došlo by k roztažení odlitku.

**Smrštění bez předpětí při teplotě lité 550 °C**



Obr. 5-21 Časová závislost lineárního smrštění zkušebního odlitku tvaru I z čistého zinku a slitin zinku odlitých při teplotě lité 450 °C

Smrštění bez předpětí při teplotě lití 450 °C



Obr. 5-22 Časová závislost lineárního smrštění zkušebního odlitku tvaru I z čistého zinku a slitin zinku odlitých při teplotě lití 450 °C

Toto měření bylo dále posuzováno s měřením dilatace odlitku tvaru válce, které je popsáno v následující kapitole této doktorské práce, a také s teoretickým výpočtem provedeným dle známého vzorce za použití tabelovaných hodnot, viz tabulka v příloze č. 14. Výpočet byl proveden pro odlitek délky 10 až 200 mm, kde hlavní hodnotou pro porovnání s naměřenými výsledky je velikost odlitku o délce 158 mm, obdobně jako odlitek zkoumaný experimentálním měřením. Hodnoty získané výpočtem jsou uvedeny v tabulce 5.22. Grafická závislost těchto hodnot je na obr. 5-23.

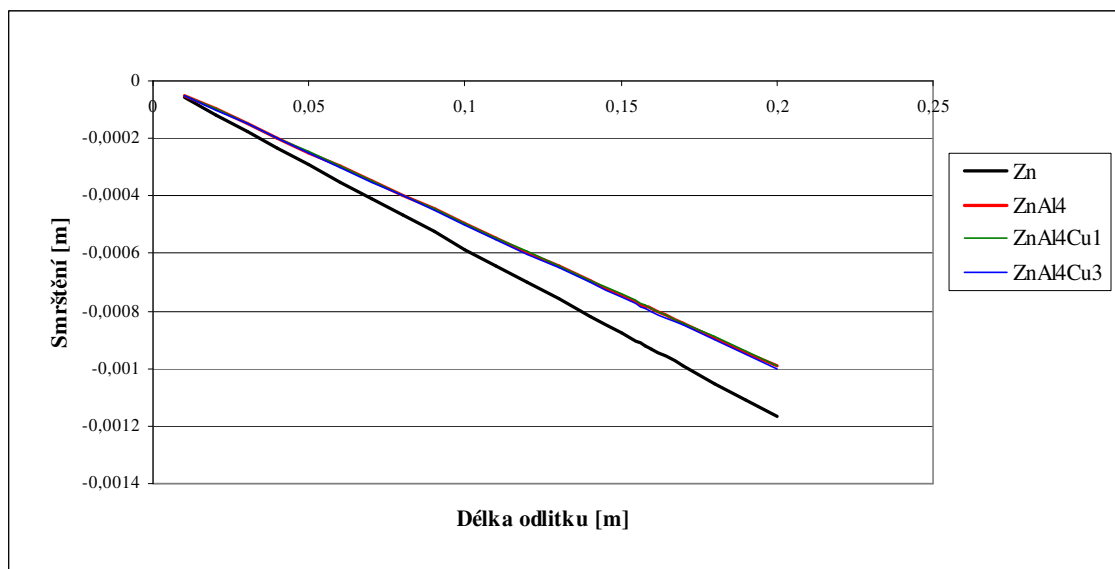
Výpočet lineárního smrštění odlitku tvaru I byl proveden dle vzorce:

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T, \quad (5.6)$$

kde značí:  $\Delta l$  - změnu rozměru délky sledovaného tělesa;  
 $l_0$  - počáteční délku sledovaného tělesa;  
 $\alpha$  - součinitel lineární roztažnosti, resp. smrštitivosti materiálu tělesa ;  
 $\Delta T$  - rozdíl teploty ve sledovaném tělese.

**Tabulka 5.22 Výpočet hodnoty lineárního smrštění odlitku tvaru I z čistého zinku a slitin zinku**

Délka odlitku [m]	Velikost lineárního smrštění odlitku tvaru I [m]			
	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
0,01	-0,0000584	-0,000049594	-0,000049457	-0,00005004
0,02	-0,0001168	-0,000099188	-0,000098914	-0,00010008
0,03	-0,0001752	-0,000148782	-0,000148371	-0,00015012
0,04	-0,0002336	-0,000198376	-0,000197828	-0,00020016
0,05	-0,0002920	-0,000247970	-0,000247285	-0,00025020
0,06	-0,0003504	-0,000297564	-0,000296742	-0,00030024
0,07	-0,0004088	-0,000347158	-0,000346199	-0,00035028
0,08	-0,0004672	-0,000396752	-0,000395656	-0,00040032
0,09	-0,0005256	-0,000446346	-0,000445113	-0,00045036
0,10	-0,0005840	-0,000495940	-0,000494570	-0,00050040
0,11	-0,0006424	-0,000545534	-0,000544027	-0,00055044
0,12	-0,0007008	-0,000595128	-0,000593484	-0,00060048
0,13	-0,0007592	-0,000644722	-0,000642941	-0,00065052
0,14	-0,0008176	-0,000694316	-0,000692398	-0,00070056
0,15	-0,0008760	-0,000743910	-0,000741855	-0,00075060
<b>0,158</b>	<b>-0,0009227</b>	<b>-0,000783585</b>	<b>-0,000781421</b>	<b>-0,000790632</b>
0,16	-0,0009344	-0,000793504	-0,000791312	-0,00080064
0,17	-0,0009928	-0,000843098	-0,000840769	-0,00085068
0,18	-0,0010512	-0,000892692	-0,000890226	-0,00090072
0,19	-0,0011096	-0,000942286	-0,000939683	-0,00095076
0,20	-0,0011680	-0,000991880	-0,000989140	-0,00100080

**Obr. 5-23 Grafická závislost vypočteného lineárního smrštění odlitku tvaru I z čistého zinku a slitin zinku**

Z grafické závislosti, viz obr. 5-21, byly dále zjištěny hodnoty smrštění chladnouceho odlitku, které odpovídaly příslušným teplotám v intervalu 400 až 20 °C. Z hodnot smrštění a odpovídajícího teplotního intervalu byly vypočítány příslušné hodnoty součinitele lineárního smrštění  $\alpha$  dle vztahu:

$$\alpha = \frac{1 \cdot dl}{l_o \cdot dT} \quad (5.7)$$

Vyčítané hodnoty součinitele dle vztahu (5.7) jsou uvedeny v tabulce 5.23.

**Tabulka 5.23 Vypočítané hodnoty součinitele teplotní smrštivosti  $\alpha$**

Teplotní interval [°C]	Součinitel lineární smrštivosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] pro čistý zinek a slitiny zinku			
	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
400 až 350	20,0.10 <sup>-6</sup>	19,8.10 <sup>-6</sup>	19,7.10 <sup>-6</sup>	19,8.10 <sup>-6</sup>
350 až 300	19,8.10 <sup>-6</sup>	19,6.10 <sup>-6</sup>	19,7.10 <sup>-6</sup>	19,6.10 <sup>-6</sup>
300 až 250	19,7.10 <sup>-6</sup>	19,3.10 <sup>-6</sup>	19,6.10 <sup>-6</sup>	19,5.10 <sup>-6</sup>
250 až 200	19,3.10 <sup>-6</sup>	19,3.10 <sup>-6</sup>	19,5.10 <sup>-6</sup>	19,3.10 <sup>-6</sup>
200 až 150	19,1.10 <sup>-6</sup>	19,0.10 <sup>-6</sup>	19,1.10 <sup>-6</sup>	19,0.10 <sup>-6</sup>
150 až 100	18,9.10 <sup>-6</sup>	18,8.10 <sup>-6</sup>	19,0.10 <sup>-6</sup>	18,9.10 <sup>-6</sup>
100 až 50	18,8.10 <sup>-6</sup>	18,6.10 <sup>-6</sup>	19,0.10 <sup>-6</sup>	18,6.10 <sup>-6</sup>
50 až 20	18,6.10 <sup>-6</sup>	18,5.10 <sup>-6</sup>	18,7.10 <sup>-6</sup>	18,6.10 <sup>-6</sup>
400 až 20	19,3.10 <sup>-6</sup>	19,1.10 <sup>-6</sup>	19,3.10 <sup>-6</sup>	19,2.10 <sup>-6</sup>

Na základě těchto hodnot lze orientačně ověřit, že hodnota lineárního smrštění tuhnuceho odlitku tvaru I (dle Bočvara a Sviderského) z teploty 400 na 20 °C činí:

- pro čistý zinek:  $158 \cdot 19,3 \cdot 10^{-6} \cdot (400 - 20) = 1,159 \text{ mm}$
- pro slitinu ZnAl4:  $158 \cdot 19,1 \cdot 10^{-6} \cdot (400 - 20) = 1,147 \text{ mm}$
- pro slitinu ZnAl4Cu1:  $158 \cdot 19,3 \cdot 10^{-6} \cdot (400 - 20) = 1,159 \text{ mm}$
- pro slitinu ZnAl4Cu3:  $158 \cdot 19,2 \cdot 10^{-6} \cdot (400 - 20) = 1,153 \text{ mm}$

## 5.7 Metalografické hodnocení struktury odlitků ze slitin zinku

Metalografické hodnocení struktury odlitků bylo provedeno jako doplnění k této kapitole. Zde byly sledovány struktury odlitků litých do forem z CT směsi (pouze slitiny zinku), dále odlitých do studené kovové formy (slitiny ZnAl4 a ZnAl4Cu1) a pro porovnání z odlitků litých tlakově do kovové formy přehřáté na 200 °C (slitiny



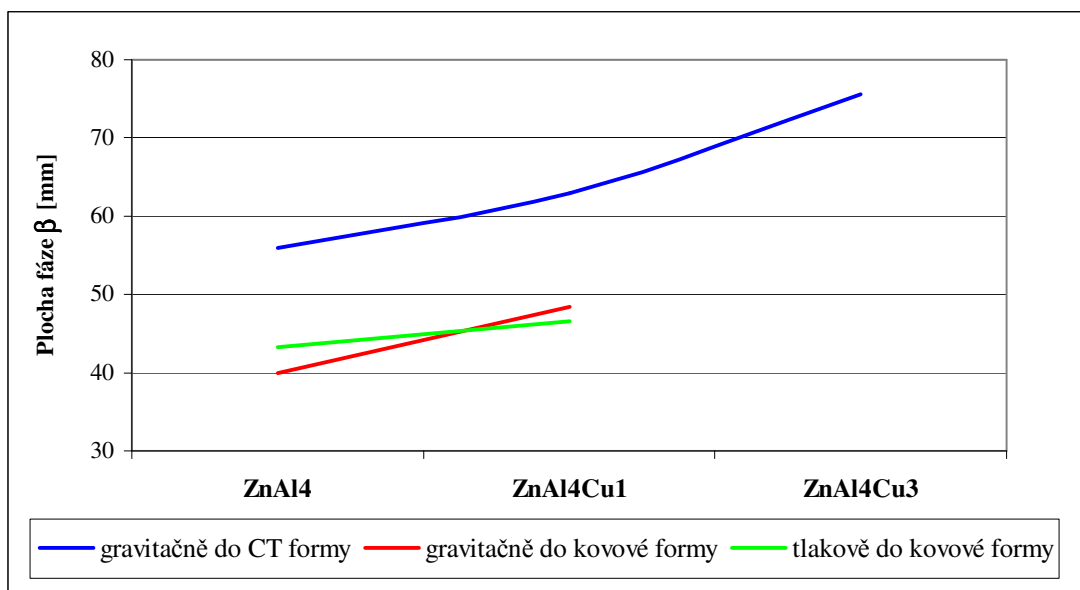
ZnAl<sub>4</sub> a ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>1</sub>). Odlitky, které byly podrobeny k hodnocení struktury, jsou uvedeny v příloze č. 15.

Vzorky byly připraveny běžným metalografickým postupem (broušeny, leštěny a leptány). Pro zvýraznění struktury bylo použito speciální leptadlo (200 g kysl. chromové, 7 g síranu sodného, 2 g fluoridu sodného a 1000 ml vody). Vzorky byly sledovány na světelném mikroskopu Neophot 21 (výrobce Carl Zeiss Jena). Dále byla struktura vyhodnocena pomocí software LUCIA.5 (od firmy Laboratory Imaging) pomocí mikroskopu Nikon Epiphot 200.

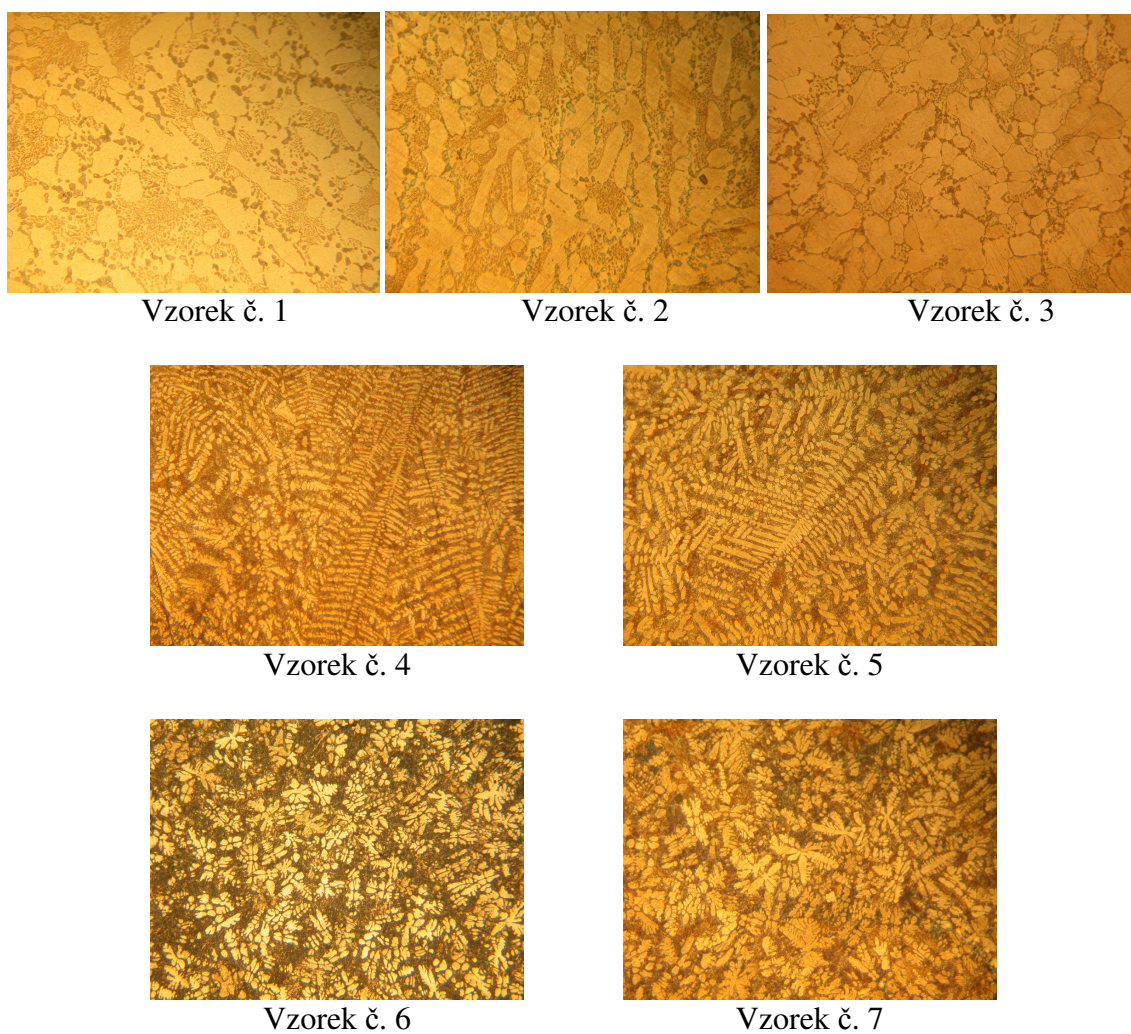
Softwaru LUCIA umožňuje tzv. „transformaci prahování objektů“, která je vhodná pro posouzení ekvivalentního průměru plochy fáze  $\eta$ . Po transformaci lze jednotlivé plochy vyhodnotit, resp. přepočítat a nahradit v tomto software plochou kruhu. Průměr daného kruhu je pak nazýván „ekvivalentní průměr“. V tabulce 5.24 jsou uvedeny velikosti plochy fáze  $\eta$  a ekvivalentní průměr plochy fáze  $\eta$ . Na obr. 5-24 je graficky zobrazena závislost velikosti ekvivalentního průměru plochy fáze  $\eta$  struktur odlitků z čistého zinku a slitin zinku odlitých do různých typů forem. Na obr. 5-25 jsou zobrazeny struktury zkoumaných vzorků při 100násobném zvětšení.

**Tabulka 5.24 Výsledky měření podílů tuhého roztoku  $\eta$  (fáze bohatá na Zn)**

Číslo vzorku	Typ taveniny	Typ lití, druh formy a počáteční teplota formy	Plocha fáze $\eta$ [ $\mu\text{m}^2$ ]	Ekvivalentní průměr plochy fáze $\eta$ [ $\mu\text{m}$ ]
1.	ZnAl <sub>4</sub>	gravitačně do formy z CT směsi	55,87	155,1
2.	ZnAl <sub>4</sub> Cu <sub>1</sub>		62,95	91,49
3.	ZnAl <sub>4</sub> Cu <sub>3</sub>		75,61	81,25
4.	ZnAl <sub>4</sub>	gravitačně do kovové formy o $T_F = 20^\circ\text{C}$	39,90	9,22
5.	ZnAl <sub>4</sub> Cu <sub>1</sub>		48,48	19,6
6.	ZnAl <sub>4</sub>	tlakově do kovové formy o $T_F = 200^\circ\text{C}$	43,32	10,36
7.	ZnAl <sub>4</sub> Cu <sub>1</sub>		46,59	39,61



Obr. 5-24 Grafická závislost plochy fáze  $\eta$  struktury odlitku z čistého zinku a slitin zinku pro jednotlivé druhy lití



Obr. 5-25 Metallograficky hodnocené struktury odlitků ze slitin zinku

## 5.8 Vyhodnocení slévárenských vlastností

V rámci této kapitoly byly sledovány slévárenské vlastnosti čistého zinku a slitin zinku, mezi kterými byla tavitelnost, zabíravost, průběh a doba tuhnutí, náchylnost na vznik trhlin, lineární smršťování odlitku tvaru I bez předpětí a metalografické hodnocení struktury.

Z provedených experimentálních měření je možné vyvodit tyto dílčí závěry:

1. Tavitelnost čistého zinku a slitin zinku je závislá na teplotě tání taveniny, měrné tepelné kapacitě zinku a jeho slitin a latentnímu teplu tání. Tato slévárenská vlastnost byla sledována pomocí výpočtu, na základě využití hodnot fyzikálně-tepelných veličin. Zinek a slitiny zinku patří mezi neželezné kovy s nízkou teplotou tání. Jejich teplota tání je pro čistý zinek cca 420 °C, pro slitiny tání probíhá v intervalu teplot 382 až 390 °C, také skupenské teplo tání není příliš vysoké činí cca 113 000 [J.kg<sup>-1</sup>], proto je množství dodaného tepla tavenině nižší než u jiných běžně používaných slévárenských materiálů (např. hliník má teplotu tání 660 °C a skupenské teplo tání je 397 163 J.kg<sup>-1</sup>). Pro natavení 10 kg kovu je potřeba dodat určité množství tepla. Pro čistý zinek ohřátý na teplotu 450 °C je nutno dodat 2 820,42 [kJ], slitině ZnAl4 2 782,86 [kJ], slitině ZnAl4Cu1 2 818,40 [kJ], slitině ZnAl4Cu3 2 894,40 [kJ]. V tabulkách 5.2. až 5.5 jsou uvedeny hodnoty množství tepla, které je potřeba k ohřátí 1 až 10 kg zinku a jeho slitin na teplotu 400 až 600 °C. Průběh velikosti množství dodaného tepla je patrný z grafů na obr. 5-1 až 5-4.
2. Zabíhavost čistého zinku a slitin zinku, která byla sledována pomocí Curryho spirály při teplotě lití 450 °C činila 1,425 m; pro slitinu ZnAl4 hodnota zabíhavosti je 0,742 m; pro slitinu ZnAl4Cu1 je hodnota zabíhavosti 0,672 m a u slitiny ZnAl4Cu3 je tato hodnota zabíhavosti 0,633 m. Samozřejmě u této zkoušky záleží na teplotě lití. Se zvyšující se teplotou lití narůstá i hodnota zabíhavosti. Z výsledků těchto experimentů lze konstatovat, že zinek a jeho slitiny mají vynikající zabíhavost. Tato zkouška byla provedena i pro další teploty lití a to od 420 do 550 °C. Ostatní výsledky tohoto měření jsou v tabulce 5.8.
3. Průběh a doba tuhnutí čistého zinku a slitin zinku byla sledována pomocí tzv. vylévací zkoušky. Byla provedena měření, kde byla sledována velikost ztuhlé vrstvy taveniny při lití do různých typů slévárenské formy a pro dobu tuhnutí od 0 do 55 s. V rámci tohoto měření byla stanovena konstanta tuhnutí *k*. Pro čistý zinek

činí hodnota konstanty tuhnutí pro lití do studené kovové formy  $2,07 \cdot 10^{-3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}]$ ; pro slitinu ZnAl4 je to hodnota  $2,17 \cdot 10^{-3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}]$ ; pro slitinu ZnAl4Cu1 se jedná o hodnotu  $2,39 \cdot 10^{-3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}]$  a pro slitinu ZnAl4Cu3 jde o hodnotu  $2,61 \cdot 10^{-3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}]$ . Ostatní výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 5.17.

4. Náchylnost na vznik trhlin byla u čistého zinku a slitin zinku sledována pomocí měřicího zařízení dle Bočvara a Sviderského. Z provedených experimentů, kde byla také možnost volby velikosti předpětí na pružině, je vidět, že slitiny zinku jsou odolné vůči vzniku trhlin při tuhnutí. Pouze u čistého zinku s předpětím o velikosti 1,45 [MPa] jsou patrné náznaky porušení ve střední části odlitku, který má tvar I. Dále bylo v rámci této zkoušky provedeno měření na vznik trhlin u čistého zinku při změně specifického rozměru hlavní části odlitku tvaru I (různá tloušťka střední části, resp. šířka dříku odlitku, která se pohybovala v rozsahu 4,3 do 11,38 mm). U největšího rozměru 11,38 mm (plocha průřezu  $145,2 \text{ mm}^2$ ) nedošlo k žádnému poškození odlitku; u rozměru 8,1 mm (plocha průřezu  $99,4 \text{ mm}^2$ ) se objevil malý náznak trhlin; u rozměru 7,0 mm (plocha průřezu  $78,3 \text{ mm}^2$ ) byly již viditelné trhliny a u rozměru 4,3 mm (plocha průřezu  $44,1 \text{ mm}^2$ ) došlo k porušení odlitku.
5. Lineární smršťování odlitku tvaru I bez předpětí bylo sledováno na měřicím zařízení dle Bočvara a Sviderského. Zkouška byla provedena při dvou různých teplotách lití a to  $450^\circ\text{C}$  a  $550^\circ\text{C}$ . Nejvyšší hodnota lineárního smrštění 1,45 mm byla naměřena u odlitku z čistého zinku při teplotě lití  $550^\circ\text{C}$ . Nejmenší lineární smrštění 1,24 mm bylo naměřeno za stejných podmínek lití jako nejvyšší hodnota, avšak u slitiny ZnAl4Cu3. Při teplotě lití  $450^\circ\text{C}$  se hodnota lineárního smrštění u všech typů tavenin pohybovala okolo 1,3 mm.
6. Metalografické hodnocení struktury bylo provedeno na vzorcích z odlitků litých gravitačně do formy z CT směsi, gravitačně do kovové formy a z odlitků litých tlakově do předehřáté kovové formy. Struktura odlitků byla sledována pod mikroskopem pomocí softwarového programu LUCIA.5, kde je možnost sledovat velikost plochy fáze  $\eta$ . Plocha fáze  $\eta$  má u jednotlivých typů slitin různý tvar a velikost. Slitina ZnAl4 má u všech typů odlití a forem nejmenší plochu fáze  $\eta$ . Z výsledků uvedených v tabulce 5.24 je patrné, že slitina ZnAl4 má plochu fáze  $\eta$  při gravitačním lití do formy z CT směsi o velikosti  $55,87 [\mu\text{m}^2]$ , zatímco největší plochu fáze  $\eta$  vykazuje slitina ZnAl4Cu3 odlitá také do formy z CT směsi. Zde je velikost plochy fáze  $\eta$   $75,61 [\mu\text{m}^2]$ . Při pohledu na vyobrazení sledovaných struktur





je patrné, že při rychlejším tuhnutí odlitků jsou krystaly fáze  $\eta$  jemnější a více zaoblené. Nejjemnější krystaly vykazovala struktura odlitků vyrobených tlakovým litím, jemná polyedrická zrna. To lze vysvětlit tím že u tlakového lití dochází k termickému podchlazení taveniny vlivem vysokého tlaku (cca 30 MPa) a současně k jemné struktuře odlitků přispívá i vysoká hodnota součinitele tepelné akumulace kovové formy (ta je téměř  $10\,000\text{ W}\cdot\text{s}^{1/2}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ).



## 6. EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠŤOVÁNÍ DILATAČNÍCH ZMĚN PŘI TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ ODLITKŮ Z ČISTÉHO ZINKU A JEHO SLITIN

Experimentální měření realizované v rámci této části byla provedena pro zjištění rozměrových změn (dilatometrické analýzy) při tuhnutí a chladnutí odlitků z čistého zinku a slitin zinku (ZnAl<sub>4</sub>, ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>1</sub> a ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>). Pro tyto experimenty byl použit odlitek tvaru válce a dva typy slévárenské formy - kovová a forma z CT směsi. Všechny experimenty byly provedeny v poloprovozních podmínkách Katedry strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci a bylo dbáno, aby okolní podmínky měření u všech experimentů byly stejné. Pro měření bylo použito měřicí zařízení navržené, zkonstruované a odzkoušené na Katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci.

### 6.1 Výpočet lineárního smrštění odlitku tvaru válce

Před samotným sledování dilatometrické analýzy byly nejprve provedeny orientační výpočty lineárního smrštění odlitků tvaru válce. Odlitky tvaru válce byly následně odlévány do kovové formy o rozměrech Ø 100 x 100 mm. Na obr. 6-1 je schéma půdorysu formy, dutiny formy a ztuhlého odlitku. Výpočty lineárního smrštění byly provedeny za použití známé hodnoty lineárního smrštění [%] a součinitele teplotní roztažnosti, resp. lineární teplotní roztažnosti, resp. smrštivosti  $\alpha$ . Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.1. Výpočet lineárního smrštění byl proveden pro odlitky Ø od 5 do 100 mm.

Výpočet lineárního smrštění odlitku tvaru válce byl proveden dle vzorce:

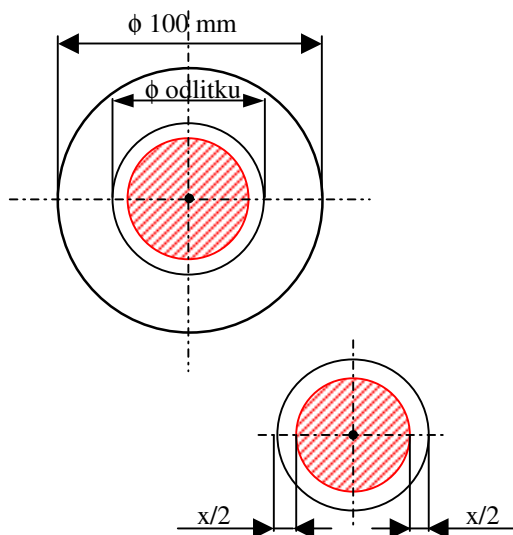
$$\Delta d = d \cdot x \quad (6.1)$$

kde značí:  $d$  - poloměr odlitku [m];  
 $x$  - velikost lineárního smrštění [%].

Dále byl pro výpočet lineárního smrštění použit vztah (5.6), který byl převeden pro odlitek tvaru válce:

$$\Delta d = \alpha \cdot d_0 \cdot \Delta T, \quad (6.2)$$

kde značí:  $\Delta d$  - změnu rozměru průměru;  
 $d_0$  - počáteční délku sledovaného objektu;  
 $\alpha$  - součinitel teplotní roztažnosti, resp. lineární smrštivosti;  
 $\Delta T$  - rozdíl teplot.



Obr. 6-1 Schéma půdorysu formy, dutiny formy a odlitku tvaru válce

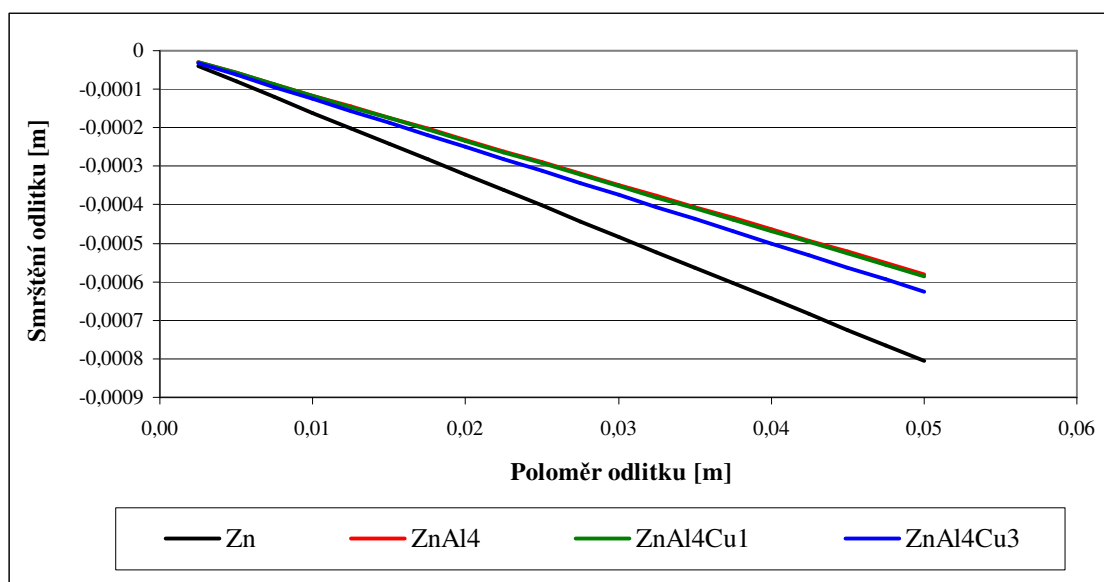
Veličiny potřebné pro výpočet velikosti lineárního smrštění odlitku tvaru válce jsou uvedeny v tabulce 6.1 a 6.2. Na obr. 6-2 je zobrazena grafická závislost vypočítaného lineárního smrštění odlitku na jeho průřezu dle rovnice (6.1). Obr. 6-3 zobrazuje grafickou závislost lineárního smrštění odlitku na jeho průřezu dle výpočtu z rovnice (6.2). Výpočet lineárního smrštění odlitku je vztažen k tepelné ose odlitku, tzn. výsledek smrštění je vztažen k poloměru odlitku.

Tabulka 6.1 Veličiny potřebné pro výpočet smrštění [29]

Slévárenský materiál	Velikost lineárního smrštění $\alpha$ [%]	Součinitel lineární roztažnosti $\alpha$ [ $K^{-1}$ ]
Zn	1,61	$29,2 \cdot 10^{-6}$
ZnAl4	1,16	$27,4 \cdot 10^{-6}$
ZnAl4Cu1	1,17	$27,4 \cdot 10^{-6}$
ZnAl4Cu3	1,25	$27,8 \cdot 10^{-6}$

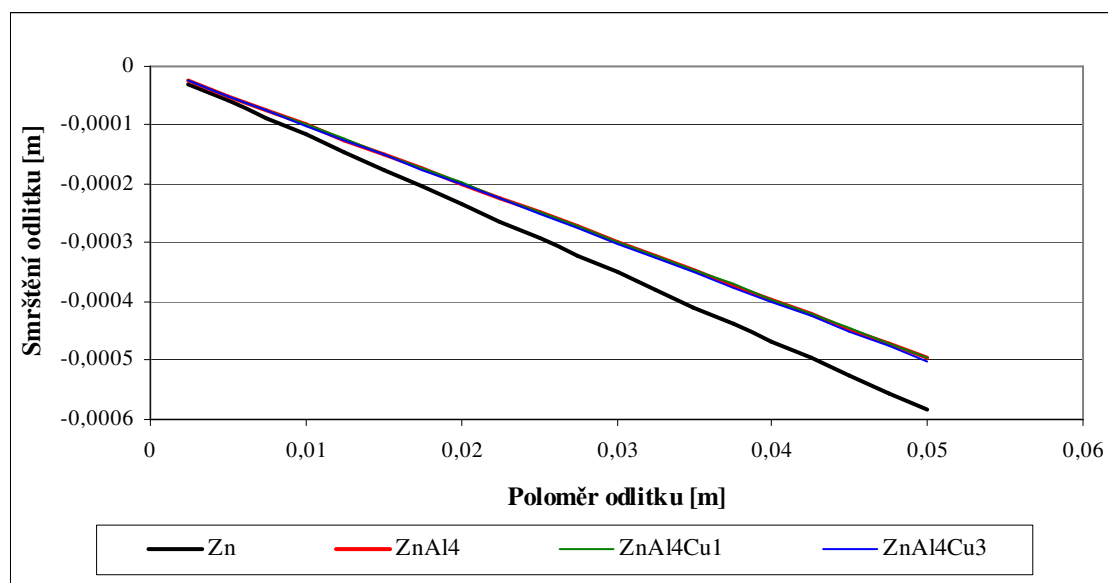
**Tabulka 6.2 Výpočet hodnoty lineárního smrštění odlitku tvaru válce z čistého zinku a slitin zinku; výpočet proveden s použitím rovnice (6.1)**

Poloměr odlitku [m]	Velikost lineárního smrštění, vztaženo k poloměru odlitku $\Delta d/2$ [m]			
	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
0,0025	-0,00004025	-0,000029	-0,00002925	-0,00003125
0,0050	-0,00008050	-0,000058	-0,00005850	-0,00006250
0,0075	-0,00012075	-0,000087	-0,00008775	-0,00009375
0,0100	-0,00016100	-0,000116	-0,00011700	-0,00012500
0,0125	-0,00020125	-0,000145	-0,00014625	-0,00015625
0,0150	-0,00024150	-0,000174	-0,00017550	-0,00018750
0,0175	-0,00028175	-0,000203	-0,00020475	-0,00021875
<b>0,0200</b>	<b>-0,00032200</b>	<b>-0,000232</b>	<b>-0,00023400</b>	<b>-0,00025000</b>
0,0225	-0,00036225	-0,000261	-0,00026325	-0,00028125
<b>0,0250</b>	<b>-0,00040250</b>	<b>-0,000290</b>	<b>-0,00029250</b>	<b>-0,00031250</b>
0,0275	-0,00044275	-0,000319	-0,00032175	-0,00034375
<b>0,0300</b>	<b>-0,00048300</b>	<b>-0,000348</b>	<b>-0,00035100</b>	<b>-0,00037500</b>
0,0325	-0,00052325	-0,000377	-0,00038025	-0,00040625
0,0350	-0,00056350	-0,000406	-0,00040950	-0,00043750
0,0375	-0,00060375	-0,000435	-0,00043875	-0,00046875
0,0400	-0,00064400	-0,000464	-0,00046800	-0,00050000
0,0425	-0,00068425	-0,000493	-0,00049725	-0,00053125
0,0450	-0,00072450	-0,000522	-0,00052650	-0,00056250
0,0475	-0,00076475	-0,000551	-0,00055575	-0,00059375
0,0500	-0,00080500	-0,000580	-0,00058500	-0,00062500

**Obr. 6-2 Grafická závislost vypočteného lineárního smrštění odlitku tvaru válce různých průměrů z čistého zinku a slitin zinku**

**Tabulka 6.3 Výpočet hodnoty lineárního smrštění odlitku tvaru válce z čistého zinku a slitin zinku; výpočet proveden s použitím rovnice (6.2)**

Velikost lineárního smrštění odlitku, vztaženo k poloměru $\Delta d/2$ [m]				
Druh taveniny	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
	Teplota solidu [°C]			
Poloměr odlitku [m]	420	382	381	380
0,0025	-0,0000292	-0,000024797	-0,000024729	-0,00002502
0,0050	-0,0000584	-0,000049594	-0,000049457	-0,00005004
0,0075	-0,0000876	-0,000074391	-0,000074185	-0,00007506
0,0100	-0,0001168	-0,000099188	-0,000098914	-0,00010008
0,0125	-0,0001460	-0,000123985	-0,000123643	-0,00012510
0,0150	-0,0001752	-0,000148782	-0,000148371	-0,00015012
0,0175	-0,0002044	-0,000173579	-0,000173100	-0,00017514
<b>0,0200</b>	<b>-0,0002336</b>	<b>-0,000198376</b>	<b>-0,000197828</b>	<b>-0,00020016</b>
0,0225	-0,0002628	-0,000223173	-0,000222557	-0,00022518
<b>0,0250</b>	<b>-0,000292</b>	<b>-0,00024797</b>	<b>-0,000247285</b>	<b>-0,0002502</b>
0,0275	-0,0003212	-0,000272767	-0,000272014	-0,00027522
<b>0,0300</b>	<b>-0,0003504</b>	<b>-0,000297564</b>	<b>-0,000296742</b>	<b>-0,00030024</b>
0,0325	-0,0003796	-0,000322361	-0,000321471	-0,00032526
0,0350	-0,0004088	-0,000347158	-0,000346199	-0,00035028
0,0375	-0,0004380	-0,000371955	-0,000370928	-0,00037530
0,0400	-0,0004672	-0,000396752	-0,000395656	-0,00040032
0,0425	-0,0004964	-0,000421549	-0,000420385	-0,00042534
0,0450	-0,0005256	-0,000446346	-0,000445113	-0,00045036
0,0475	-0,0005548	-0,000471143	-0,000469842	-0,00047538
0,0500	-0,0005840	-0,000495940	-0,000494570	-0,00050040

**Obr. 6-3 Grafická závislost vypočteného lineárního smrštění odlitku tvaru válce různých průměrů z čistého zinku a slitin zinku**

## 6.2 Měření dilatace odlitku

Sledování dilatačních změn odlitků (dilatometrická analýza) bylo provedeno pomocí měřicího zařízení, které umožňuje registrovat současně termickou i dilatometrickou analýzu tuhnoucí taveniny a následně chladnoucího odlitku. Toto měřicí zařízení (bylo zkonstruováno na TU v Liberci) se skládá ze tří základních součástí:

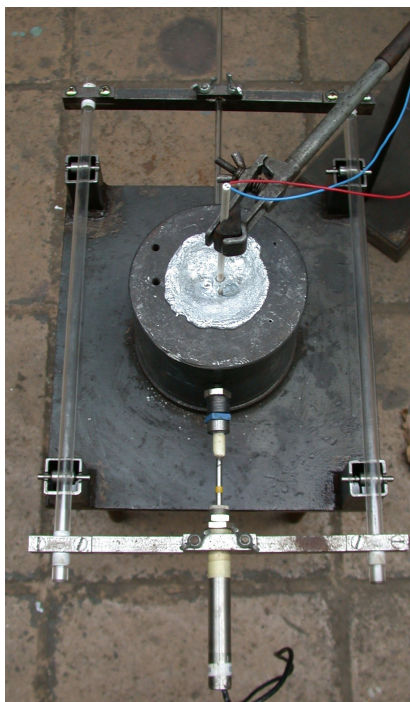
- a) měřicí rám s čidly teploty a polohy;
- b) dilatometr Crystaldigraph PC 4T2L (A/D převodník);
- c) PC s programovým vybavením pro zpracování naměřených hodnot.

Popis tohoto měřicího zařízení je uveden v následující kapitole 6.2.1.

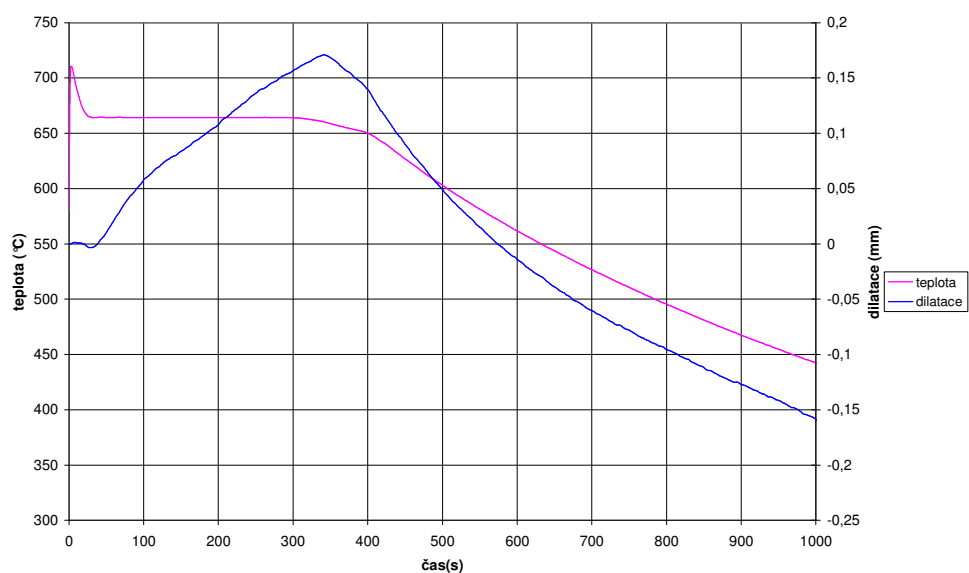
### 6.2.1 Popis měřicího zařízení pro měření dilatace odlitku

Speciální měřicí rám umožňuje sledování dilatace tuhnoucí taveniny odlitku  $\varnothing 60 \times 70$  mm, viz obr. 6-4, ale i odlitků  $\varnothing 40 \times 70$  mm a  $\varnothing 50 \times 70$  mm. Pohyblivý rám je umístěn na otočných kovových válečkách, které zajišťují plynule vedení rámu v horizontálním směru vůči základní desce s otočnými válečky, ve které je umístěn kruhový kovový rám formy s vnitřním průměrem 100 mm a výškou 100 mm. V rámu je zaformován válec o požadovaném vnitřním průměru a výšce, forma je z CT směsi. V případě kovové formy jsou vnější rozměry formy shodné s rozměry rámu pro formu z CT směsi. V polovině výšky dutiny formy tvaru válce jsou zabudované dvě křemenné trubičky o průměru 5 mm. Osa trubiček protíná kolmo osu válečku. Trubičky přecházejí do vnitřního prostoru válečku přibližně o 5 až 7 mm. Pohyblivý rám se skládá ze dvou ocelových ramen, na kterých jsou pomocí svěrných ramen upevněny dvě křemenné trubice o průměru 10 mm, které slouží jako pohyblivé vedení rámu a zajišťují jeho celkovou tuhost. Na prvním rameni je pomocí objímky a magnetu upevněn indukční snímač polohy o rozsahu 1,5 cm. Na druhém rameni je pevně uchycena křemenná trubička o průměru 5 mm. Snímač je držen v nulové výchylce pružinkou umístěnou uvnitř snímače. Pohyblivý dotyk snímače je pomocí magnetu pevně opřen o vnější konec křemenné trubičky o průměru 5 mm opatřené kovovou koncovkou. Průběh teploty je snímán termočlánkem, který je upevněn v držáku a umístěn do osy formy. Měřicí zařízení je zapojeno před převodník polské provenience na PC, kde jsou měřené

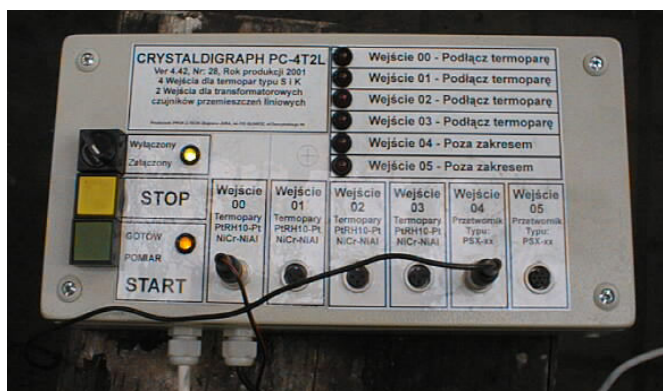
hodnoty dilatace a teploty zakresleny do grafické závislosti, viz obr. 6-5. Převodník je zobrazen na obr. 6-6.



Obr. 6-4 Pohled na rám měřícího zařízení s odlitkem a kovovou formou



Obr. 6-5 Ukázka grafické znázornění měřeného experimentu (křivka teploty a dilatace)



Obr. 6-6 Převodník měřicího zařízení (CRYSTALOGRAPH PC 4T2L), polské provenience

### 6.2.2 Charakteristika použitých slévarenských forem

Při tomto experimentu byly použity, z hlediska materiálu, dva druhy slévarenských forem: kovová forma a forma z CT směsi. Tyto odlišné materiály byly voleny z důvodu, že materiál formy zásadním způsobem ovlivňuje odvod tepla z taveniny. Kovová forma má vysokou tepelnou vodivost a také velkou akumulační schopnost a může tak odebrat tavenině v krátké době velké množství tepla. Současně byl sledován také vliv její počáteční teploty na výslednou dilataci odlitku. Písková forma má oproti kovové formě malou tepelnou vodivost a také nižší schopnost akumulovat teplo. Proto odvod tepla z jejího líce do vzdálenějších partií formy je pomalý. Materiál formy výrazným způsobem ovlivňuje rozměrové změny při tuhnutí a chladnutí odlitků.

Pro experimenty byly použity 3 **kovové formy** z materiálu ČSN 19 552, válcového tvaru o rozměrech  $\varnothing 100 \times 100$  mm s dutinou formy je  $\varnothing 60 \times 70$  mm. Dále s dutinou  $\varnothing 50 \times 70$  mm a  $\varnothing 40 \times 70$  mm. Každá z těchto forem obsahuje díry pro zavedení termočlánků do dutiny formy a pro ustavení křemenných trubiček. Parametry, chemické složení a struktura oceli použité na kovovou formu jsou uvedeny v příloze č. 16.

**Forma z CT směsi** je tvořena z křemenného písku, vodního skla a přísad pro zlepšení rozpadavosti formy po odlití. Rozměry formy jsou stejné jako u formy kovové. V tabulce 6.4 jsou uvedeny vlastnosti a charakteristiky CT směsi použité pro výrobu forem. Vnější rozměr formy je  $\varnothing 100 \times 100$  mm s dutinou  $\varnothing 60 \times 70$  mm.



**Tabulka 6.4 Vlastnosti použité CT směsi a formy z této směsi**

Charakteristika směsi	vodní sklo	m = 2,4	4 %
	Ostřívo	Křemenný písek Střeleč T2S	
	vytvrzeno	CO <sub>2</sub>	
Mechanické a fyzikální vlastnosti směsi			
Hustota; $\rho$ [ $kg.m^{-3}$ ]		1500	
Pevnost v tlaku $R_{m_t}$ [MPa]		0,78	
Prodyšnost $D$ [n.j.p]		460	
Střední velikost zrna $d_{50}$ [mm]		0,27	
Součinitel tepelné akumulace formy $b_F$ [ $W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}$ ]		1168	
Součinitel tepelné vodivosti formy $\lambda_F$ [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ]		1,06	
Měrná tepelná kapacita formy $c_F$ [ $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ]		861,8	

### 6.2.3 Popis provedených experimentálních měření dilatace zkoumaného odlitku

Měření dilatometrické analýzy byla provedena za účelem získání hodnoty lineárního smrštění odlitku tvaru válce při tuhnutí a chladnutí. Pro toto měření byl použit čistý zinek a slitiny zinku. Chemické složení použitých slitin je uvedeno v tabulce 5.1. Experimentální měření bylo provedeno ve dvou etapách a bylo provedeno na měřícím zařízení popsaném v kapitole 6.2.1.

V *I. etapě* byla provedena měření, na nichž byl sledován vliv použité slévárenské formy na velikost lineárního smrštění odlitku tvaru válce z výše uvedených slévárenských materiálů. Pro měření byly použity slévárenské formy kovová a forma z CT směsi. Odlévání do kovové formy bylo provedeno při dvou různých počátečních teplotách formy, a to 20 °C a 200 °C. Teplota lití byla 550 °C a 450 °C. Charakteristika použitých slévárenských forem je uvedena v kapitole 6.1.2.

Ve *II. etapě* byla provedena měření, kde byl sledován vliv tloušťky odlitku na velikost lineárního smrštění odlitku tvaru válce. Pro tuto část experimentálního měření byly použity odlitky tvaru válce o rozměrech Ø 60 x 70 mm, Ø 50 x 70 mm, Ø 40 x 70mm. Zde bylo provedeno lití pouze do kovové formy s počáteční teplotou 20 °C a vnějšími rozměry Ø 100 x 100 mm. Teplota lití byla 550 °C.

Použité slévárenské slitiny, tj. zinek a jeho slitiny byly taveny v grafitovém kelímku v odporové peci (výrobce BEZ Bratislava). Před každým odléváním tavenina byla metalurgicky ošetřena, zbavena strusky. Současně těsně před jejím odlitím bylo provedeno měření teploty pomocí digitálního teploměru MIKROTERM (výrobce Závody měřicí a regulační techniky Polička), aby byly zajištěny pokud možno stejné

podmínky experimentů. Poté byla tavenina odlita do připravené dutiny slévárenské formy, která byla umístěna v podstavci připraveného měřicího zařízení. Jednotlivá měření dilatace byla sledována a registrována PC. Na monitoru počítače se zobrazovaly hodnoty dilatace a teploty v reálném čase, dále se teplota znázorňovala v grafické závislosti. Dilatace i teplota jsou funkcí času:  $d = f(t)$ ,  $T = f(t)$ . Všechny získané hodnoty dilatace a teploty byly ukládány do souboru ve formátu \*.dat. S tímto souborem bylo dále pracováno a pomocí programu byly provedeny derivace získaných hodnot dilatace a teploty:

$$T^* = \frac{dT_{(t)}}{dt} \quad (6.2)$$

$$\Delta L^* = \frac{d\Delta L_{(t)}}{dt} \quad (6.3)$$

Získané hodnoty dilatace, teploty a jejich derivace byly exportovány do MS Excel a k jednotlivým hodnotám byly zhotoveny grafické závislosti. Na obr 6-7 je uvedena ukázka grafické závislosti dilatace a teploty na čase. Dále jsou z obrázku patrné veličiny, které byly z jednotlivých záznamů měření vyhodnoceny.

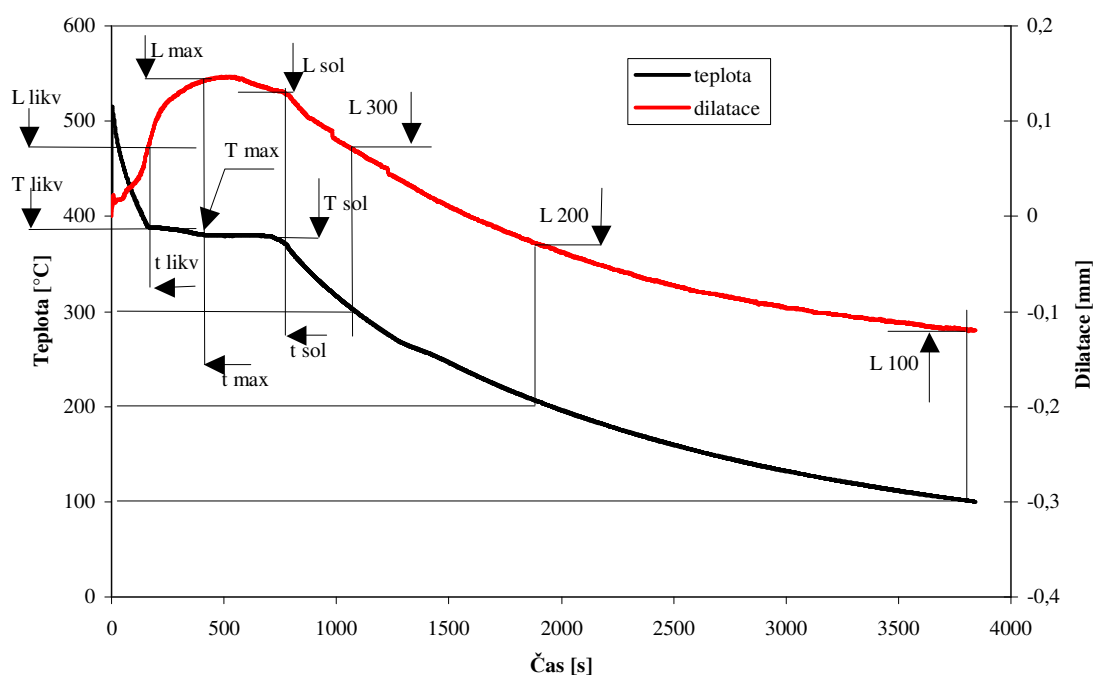
Všechny experimenty byly realizovány dle výše uvedených etap. Při jednotlivých měřeních byly získány časové průběhy dilatačních a teplotních křivek tuhnuoucích odlitků z čistého zinku a slitin zinku. Měření bylo ukončeno při dosažení teploty 100 °C v tepelné ose odlitku. Tato hodnota byla zvolena proto, že tuhnutí a chladnutí odlitku v předehřáté kovové formě na teplotu okolí (asi 20 °C) probíhá velmi dlouho a program nemůže z kapacitního hlediska pojmout takové množství dat (jedná se o starší verzi programu, dosud nebyl inovován).

### 6.3 Vyhodnocení měření dilatometrické analýzy

Z provedených experimentů byly získány časové závislosti dilatačních změn (dilatometrická analýza) tuhnuoucích odlitků tvaru válce, které byly dále zpracovány a jejich výsledky vyhodnoceny v souvislosti s rozdělením experimentálních měření do jednotlivých etap. Chladnutí odlitku bylo sledováno do teploty 100 °C. Hlavní význam mají hodnoty maximální dilatace a dilatace odečtené při tuhnutí odlitků, tj.  $L_{likv}$  a  $L_{sol}$ , a také hodnoty odečtené při chladnutí odlitku -  $L_{300}$ ,  $L_{200}$  a  $L_{100}$  (hodnoty odečtené při teplotě chladnoucího odlitku 300 °C, 200 °C a 100 °C). Dalším hodnotícím

kritériem je maximální dilatace  $L_{\max}$  a hodnota získaná z rozdílu  $L_{\max} - L_{100}$  a také poměr  $L_{100}/(\text{průměr odlitku})$ . Souběžně s dilatometrickou analýzou byl sledován také čas ( $t_{\text{likv}}$ ,  $t_{\text{sol}}$  a  $t_{\text{max}}$ ) a teplota ( $T_{\text{likv}}$ ,  $T_{\text{sol}}$  a  $T_{\text{max}}$ ) získané při jednotlivých experimentálních měření. Naměřené a vypočtené hodnoty dilatací, teplot a času pro jednotlivá experimentální měření jsou uvedeny v tabulce 6.5.

Získané hodnoty byly zpracovány pomocí grafických závislostí a z nich vyvozeny dílčí závěry.



$T_{\text{likv}}$  - teplota počátku tuhnutí odlitku;  $t_{\text{likv}}$  - doba počátku tuhnutí odlitku;  $L_{\text{likv}}$  - dilatace odlitku, která odpovídá počátku tuhnutí odlitku (vztaženo k nulové hodnotě);  $T_{\text{max}}$  - teplota maximální dilatace;  $t_{\text{max}}$  - doba, kdy byla dosažena maximální dilatace odlitku;  $L_{\text{max}}$  - maximální dilatace tuhnoucího odlitku (vztaženo k nulové hodnotě);  $T_{\text{sol}}$  - teplota konce tuhnutí odlitku;  $t_{\text{sol}}$  - doba, kdy byla dosažena teplota konce tuhnutí;  $L_{\text{sol}}$  - dilatace odlitku, která odpovídá teplotě konce tuhnutí odlitku;  $L_{300}$  - dilatace odlitku vztažena k teplotě 300 °C;  $L_{200}$  - dilatace odlitku vztažena k teplotě 200 °C;  $L_{100}$  - dilatace odlitku vztažena k teplotě 100 °C

Obr. 6-7 Grafická závislost dilatace a teploty na čase s vyznačením důležitých hodnocených veličin



Tabulka 6.5 Hodnoty dilatace a teploty z jednotlivých etap měření

Č. měř.	Druh taveniny	Teplota lití [°C]	Druh formy a průměr odlitku	Charakteristiky dilatace											
				T <sub>likv</sub> [°C]	T <sub>sol</sub> [°C]	T <sub>lmax</sub> [°C]	t <sub>likv</sub> [s]	t <sub>sol</sub> [s]	t <sub>max</sub> [s]	L <sub>likv</sub> [mm]	L <sub>sol</sub> [mm]	L <sub>max</sub> [mm]	L <sub>300</sub> [mm]	L <sub>200</sub> [mm]	L <sub>100</sub> [mm]
I. etapa měření															
1.	Zn	550	KVT - Ø 60	414,55	413,39	429,24	34,8	70,8	10,8	-0,0018	-0,0371	0,0034	-0,1947	-0,2311	-0,3142
2.		550	KVS - Ø 60	418,62	418,44	425,28	27,2	46,8	13,2	-0,0046	-0,0171	0,0031	-0,0804	-0,1022	-0,1009
3.		550	CT - Ø 60	419,86	419,72	419,88	153,6	511,2	502,8	0,0656	0,0884	0,1156	0,0201	-0,0631	-0,1379
4.		450	KVT - Ø 60	419,74	419,36	420,22	15,6	73,2	9,6	-0,0113	-0,0487	-0,0093	-0,1855	-0,3462	-0,4354
5.		450	KVS - Ø 60	419,3	419,04	420,95	10,8	40,8	2,4	-0,0012	-0,0122	-0,013	-0,1308	-0,2505	-0,376
6.		450	CT - Ø 60	420,95	420,71	420,86	45,6	372	128,4	0,0605	0,0342	0,078	-0,1089	-0,2023	-0,302
7.	ZnAl4	550	KVT - Ø 60	386,9	379,94	413,7	26,4	103,2	9,6	-0,0159	-0,0858	0,0126	-0,22	-0,3834	-0,4783
8.		550	KVS - Ø 60	388,39	381,43	387,36	24	70,8	42	0,0489	0,0198	0,0602	-0,0919	-0,3087	-0,4686
9.		550	CT - Ø 60	388,29	715,2	382,75	205,2	381,3	439,2	0,0405	0,0598	0,0705	-0,0391	-0,1209	-0,198
10.		450	KVT - Ø 60	387,78	380,37	384,09	18	85,2	62,4	-0,0023	0,0005	0,0018	-0,0197	-0,1018	-0,1581
11.		450	KVS - Ø 60	388,32	381,8	386,01	19,2	61,2	45,6	0,0068	0,0075	0,017	-0,0469	-0,149	-0,2247
12.		450	CT - Ø 60	386,47	377,57	384,43	50,4	344,4	108	0,0032	-0,0552	0,0059	-0,1401	-0,2706	-0,3816
13.	ZnAl4Cu1	550	KVT - Ø 60	389,88	380,03	388,5	26,4	76,8	40,8	0,015	0,0119	0,016	-0,0312	-0,0561	-0,1148
14.		550	KVS - Ø 60	391,64	388,52	390,89	28,8	50,4	38,4	0,0278	0,0186	0,0304	-0,1047	-0,302	-0,4766
15.		550	CT - Ø 60	388,66	379,11	379,67	171,6	706,8	522	0,0795	0,14	0,1467	0,0682	-0,0341	-0,1198
16.		450	KVT - Ø 60	390,72	381,14	402,37	14,4	61,2	3,6	-0,0001	-0,031	0,0011	-0,15	-0,228	-0,2337
17.		450	KVS - Ø 60	392,49	383,26	391,42	9,6	55,2	27,6	0,0182	0,0217	0,0388	-0,0294	-0,1786	-0,2909
18.		450	CT - Ø 60	391,74	382,21	385,64	20,4	237,6	100,8	0,0006	-0,0308	0,0008	-0,154	-0,2813	-0,4026



Tabulka 6.5 - pokračování

Č. měř.	Druh taveniny	Teplota liti [°C]	Druh formy a průměr odlitku	Charakteristiky dilatace											
				T <sub>likv</sub> [°C]	T <sub>sol</sub> [°C]	T <sub>lmax</sub> [°C]	t <sub>likv</sub> [s]	t <sub>sol</sub> [s]	t <sub>max</sub> [s]	L <sub>likv</sub> [mm]	L <sub>sol</sub> [mm]	L <sub>max</sub> [mm]	L <sub>300</sub> [mm]	L <sub>200</sub> [mm]	L <sub>100</sub> [mm]
I. etapa měření - pokračování															
19.	ZnAl4Cu3	550	KVT - Ø 60	397,16	378,97	398,15	18	74,4	90	0,0192	0,036	0,0362	0,0181	-0,0736	-0,1472
20.		550	KVS - Ø 60	400,26	381,08	398,28	20,4	58,8	36	0,042	0,0448	0,0521	0,0062	-0,0463	-0,1787
21.		550	CT - Ø 60	398,49	381,42	395,82	184,8	668,4	283,2	0,0184	-0,0106	0,0386	-0,1166	-0,2226	-0,2842
22.		450	KVT - Ø 60	396,42	379,26	397,01	18	80,4	13,2	-0,0031	-0,0297	-0,003	-0,1196	-0,1961	-0,2061
23.		450	KVS - Ø 60	398,7	387,59	398,47	18	56,4	20	0,0075	-0,0342	0,0077	-0,1387	-0,2319	-0,302
24.		450	CT - Ø 60	398,16	381,28	394,85	50,4	418,8	128,4	0,0294	-0,0174	0,0536	-0,1385	-0,2897	-0,4142
II. etapa měření															
25.	Zn	550	KVS - Ø 40	419,97	419,22	420,06	15,6	25,2	13,2	-0,0025	-0,0298	-0,0005	-0,1327	-0,2297	-0,3256
26.		550	KVS - Ø 50	418,31	418,06	420,16	13,2	36	8,4	-0,0087	-0,0841	0,0053	-0,1705	-0,2671	-0,3946
27.		550	KVS - Ø 60	411,48	411,06	411,31	15,6	40,8	32,4	0,0201	0,0335	0,0359	-0,0043	-0,1695	-0,3203
28.	ZnAl4	550	KVS - Ø 40	389,17	383,93	421,71	16,8	30	4,8	-0,0236	-0,0699	0,0075	-0,1622	-0,2892	-0,401
29.		550	KVS - Ø 50	391,21	384,88	396,71	12	43,2	4,8	-0,0077	-0,0355	-0,0002	-0,1371	-0,2545	-0,3903
30.		550	KVS - Ø 60	388,39	381,43	387,36	24	70,8	42	0,0489	0,0198	0,0602	-0,0919	-0,3087	-0,4686
31.	ZnAl4Cu1	550	KVS - Ø 40	393,36	384,35	392,84	15,6	30	18	0,018	0,0066	0,0187	-0,059	-0,194	-0,292
32.		550	KVS - Ø 50	395,88	388,02	394,9	10,8	36	21,6	0,0059	0,0001	0,0096	-0,0948	-0,1743	-0,246
33.		550	KVS - Ø 60	391,64	388,52	390,89	28,8	50,4	38,4	0,0278	0,0186	0,0304	-0,1047	-0,302	-0,4766
34.	ZnAl4Cu3	550	KVS - Ø 40	394,5	383,94	398,81	12	26,4	8,4	0,0033	-0,0175	0,0042	-0,1041	-0,2208	-0,3056
35.		550	KVS - Ø 50	394,97	385,47	393,41	18	43,2	27,6	0,0287	-0,0015	0,0288	-0,1387	-0,2539	-0,3871
36.		550	KVS - Ø 60	393,61	383,95	393,29	15,6	55,2	27,6	0,0114	-0,0168	0,0141	-0,1603	-0,3426	-0,5151

Poznámka: KVT - kovová forma teplá (o teplotě 200 °C), KVS - kovová forma studená (o teplotě 20 °C), CT - forma z CT směsi.



### 6.3.1 Hodnocení I. etapy experimentálních měření

Zde bylo provedeno experimentální měření dilatace tuhoucích odlitků odlitých do dvou různých typů slévarenských forem - kovová forma a forma z CT směsi. Teplota kovové formy byla 20 °C a 200 °C. Teplota lití byla 550 °C a 450 °C. Z naměřených hodnot lze posuzovat tyto závislosti:

- a) vztah mezi rozměrovými změnami (dilatací) a druhem použité formy;
- b) poměr dilatace ku průměru zkoumaného odlitku;
- c) celková doba tuhnutí zkoumaného odlitku;
- d) velikost dilatace při  $T_{\text{likv}}$ ;
- e) velikost dilatace při  $T_{\text{sol}}$ ;
- f) vliv teploty lití na rozměrové změny v souvislosti s použitím typu formy.

Průběhy dilatačních analýz získané z jednotlivých experimentálních měření jsou uvedeny v příloze č. 17.

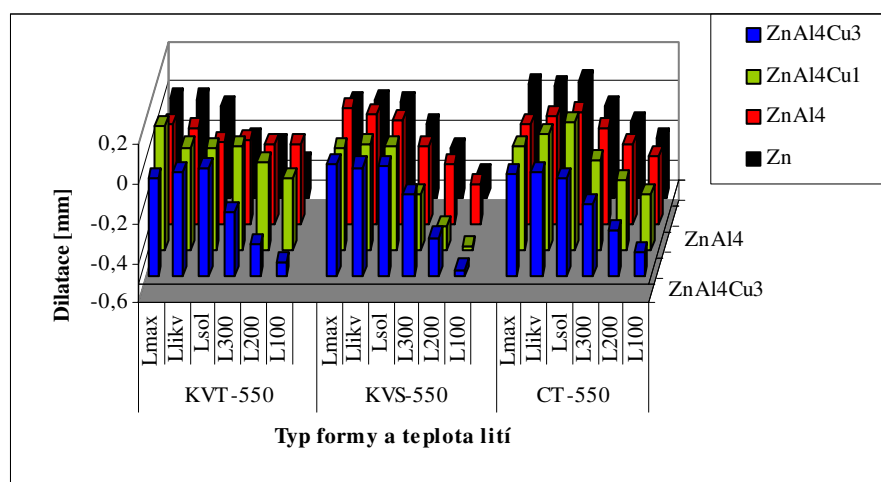
#### A) Vztah mezi rozměrovými změnami (dilatací) odlitku a druhem použité formy

Pro toto hodnocení byly ze získaných grafických závislostí experimentálních měření odečteny hodnoty dilatace při specifických teplotách, viz tabulka 6.5 a obr. 6-7.

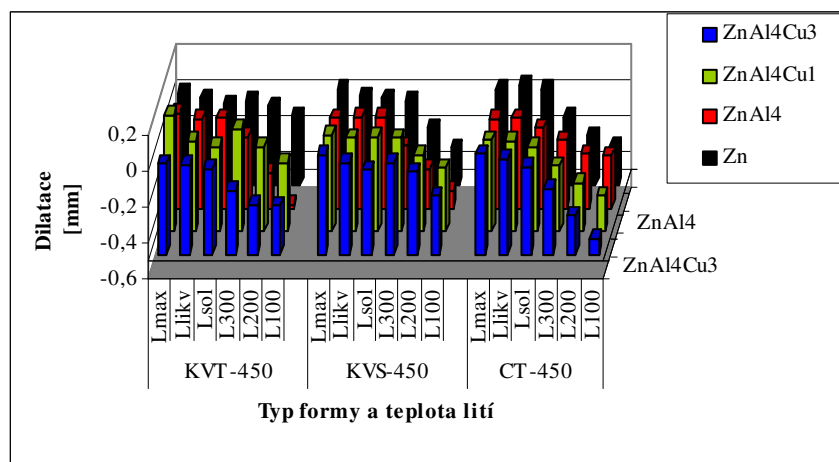
Na obr. 6-8 je znázorněna grafická závislost dilatace čistého zinku a slitin zinku (ZnAl4, ZnAl4Cu1 a ZnAl4Cu3) při odlévání odlitku Ø 60 x 70 mm v souvislosti s typem formy (kovová bez předeřevu, kovové předeřátí na teplotu cca 200 °C a formy z CT směsi) a teplotou lití, která byla 550 °C. Pro kovovou formu jejíž počáteční teplota byla 200 °C vykazuje největší dilataci (při teplotě 100 °C) slitina ZnAl4Cu3, hodnota dilatace je -0,4354 [mm], tím došlo ke smrštění odlitku o 0,73 % jeho původního průměru. Nejmenší dilataci odlitku vykazuje slitina ZnAl4 jejíž hodnota je -0,1009 [mm], tj. smrštění o 0,17 %. Pro kovovou formu jejíž teplota byla 20 °C vykazuje největší dilataci slitina ZnAl4Cu1 a hodnota dilatace je -0,4783 [mm], došlo ke smrštění odlitku o 0,8 %. Nejmenší dilataci odlitku vykazuje slitina ZnAl4 jejíž hodnota je -0,302 [mm], tj. smrštění o 0,50 %. Pro formu z CT směsi vykazuje největší dilataci slitina ZnAl4Cu3 a hodnota dilatace je -0,3816 [mm], došlo ke smrštění odlitku o 0,64 %. Nejmenší dilataci odlitku vykazuje slitina ZnAl4 jejíž hodnota je -0,1581 [mm], tj. smrštění o 0,26 %.

Na obr. 6-9 je znázorněna grafická závislost dilatace čistého zinku a slitin zinku (ZnAl4, ZnAl4Cu1 a ZnAl4Cu3) při odlévání odlitku Ø 60 x 70 mm v souvislosti

s typem formy (kovová bez předehřevu, kovové předehřátí na teplotu cca 200 °C a formy z CT směsi) a teplotou lití, která byla 450 °C. Pro kovovou formu předehřátou na teplotu 200 °C vykazuje největší dilataci slitina ZnAl4, hodnota dilatace činí -0,4766 [mm], došlo ke smrštění odlitku o 0,79 %. Nejmenší dilataci odlitku vykazuje čistý zinek jejíž hodnota je -0,1148 [mm], tj. smrštění o 0,19 %. Pro kovovou formu jejíž teplota byla 20 °C vykazuje největší dilataci slitina ZnAl4 a hodnota dilatace je -0,4026 [mm], došlo ke smrštění odlitku o 0,67 %. Nejmenší dilataci odlitku vykazuje slitina ZnAl4Cu1 jejíž hodnota je -0,1472 [mm], tj. smrštění o 0,25 %. Pro formu z CT směsi vykazuje největší dilataci slitina ZnAl4Cu3 a hodnota dilatace je -0,4142 [mm], došlo ke smrštění odlitku o 0,69 %. Nejmenší dilataci odlitku vykazuje slitina ZnAl4 jejíž hodnota je -0,2061 [mm], tj. smrštění o 0,34 %.



Obr. 6-8 Grafická závislost dilatace tavenin při odlévání odlitků Ø 60 x 70 mm ze zinku a jeho slitin na použitém typu formy (kovová bez předehřevu, kovová 200 °C a CT směs) při teplotě lití 550 °C



Obr. 6-9 Grafická závislost dilatace tavenin při odlévání odlitků Ø 60 x 70 mm ze zinku a jeho slitin na použitém typu formy (kovová bez předehřevu, kovová 200 °C a CT směs) při teplotě lití 450 °C



B) Poměr dilatace odlitku při teplotě 100 °C k počátečnímu průměru odlitku

Poměr absolutní hodnoty dilatace k průměru zkoumaného odlitku byl vztažen k hodnotě dilatace chladnoucího zkoumaného odlitku odečtené při teplotě 100 °C. V tabulce 6.6 jsou hodnoty poměru dilatace a průměru odlitku pro jednotlivé zkoumané materiály odlitků, typy forem (kovová bez přehřevu, kovová 200 °C a z CT směsi) a teploty lití.

**Tabulka 6.6 Poměr absolutní hodnoty dilatace odlitku při teplotě 100 °C na průměru zkoumaných odlitků**

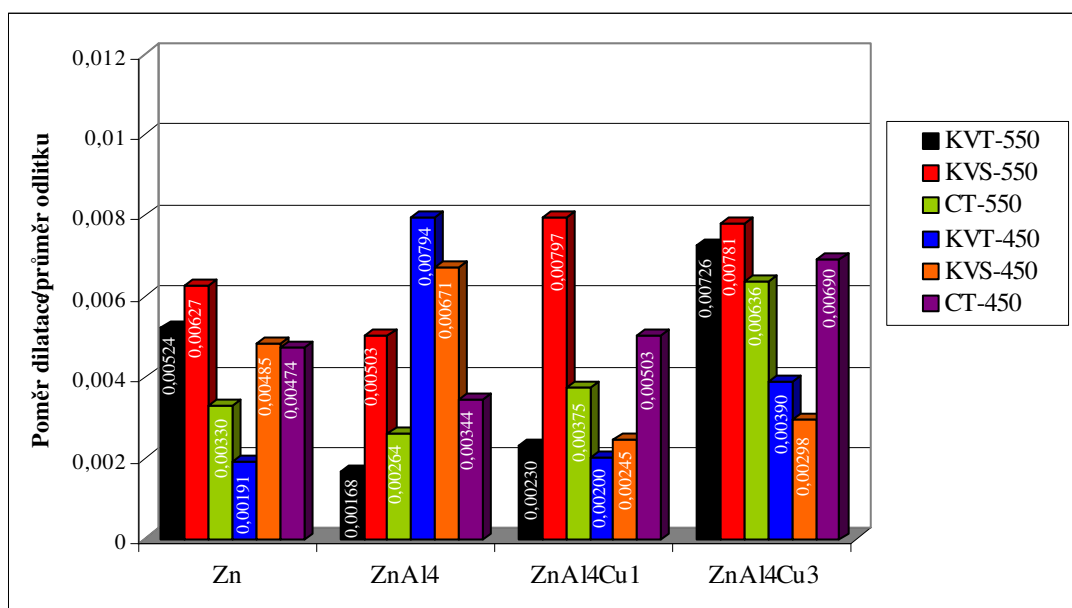
Poměr $L_{100}/\varnothing$ [1]					
Typ formy a průměr odlitku [mm]	Teplota lití [°C]	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
KVT - $\varnothing$ 60	550	0,0052	0,0080	0,0019	0,0025
KVS - $\varnothing$ 60	550	0,0017	0,0078	0,0079	0,0030
CT - $\varnothing$ 60	550	0,0023	0,0033	0,0020	0,0044
KVT - $\varnothing$ 60	450	0,0073	0,0026	0,0039	0,0034
KVS - $\varnothing$ 60	450	0,0063	0,0037	0,0048	0,0050
CT - $\varnothing$ 60	450	0,0050	0,0064	0,0067	0,0069

*Poznámka: KVT - kovová forma teplá (o teplotě 200 °C), KVS - kovová forma studená (o teplotě 20 °C), CT - forma z CT směsi.*

Na obr. 6-10 je graficky znázorněn poměr velikosti dilatace, resp. smrštění, naměřené při teplotě 100 °C vztažený k počátečnímu průměru zkoumaného odlitku, který byl odlit za teploty 550 °C. Pro odlitek z kovové formy přehřáté na teplotu 200 °C je tento poměr nejvyšší u slitiny ZnAl4Cu3 a jeho hodnota je 0,0073. Nejnížší poměr vykazuje slitina ZnAl41 jehož hodnota je 0,0017. Pro odlitek z kovové formy o teplotě 20 °C je nejvyšší hodnota poměru u slitiny ZnAl4Cu1 a činí 0,0080; zatímco nejnížší hodnota je 0,0050 pro slitinu ZnAl4. U odlitku z formy z CT směsi je nejvyšší hodnota poměru u slitiny ZnAl4Cu3 a jeho hodnota je 0,0064; naopak nejnížší hodnota poměru je u slitiny ZnAl4 a činí 0,0026.

Poměr velikosti dilatace, resp. smrštění, naměřené při teplotě 100 °C vztažený k průměru zkoumaného odlitku, který byl odlit za teploty 450 °C je pro odlitek z kovové formy o teplotě 200 °C nejvyšší u slitiny ZnAl4 a jeho hodnota je 0,0079. Nejnížší poměr vykazuje čistý zinek jehož hodnota je 0,0019. Pro odlitek z kovové formy o teplotě 20 °C je nejvyšší hodnota poměru u slitiny ZnAl4 a činí 0,0067; zatímco nejnížší hodnota je 0,0025 pro slitinu ZnAl4Cu1. U odlitku z formy z CT směsi

je nejvyšší hodnota poměru u slitiny  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$  a jeho hodnota je 0,0069; naopak nejnižší hodnota je 0,0034 u slitiny  $\text{ZnAl}_4$ .



Obr 6-10 Poměr absolutní hodnoty dilatace odlitků k jejich průměru ze zinku a jeho slitin při teplotě 100 °C odlévaných do různých typů forem, teplota lití 450 a 550 °C

### C) Celková doba tuhnutí zkoumaných odlitků

Doba tuhnutí zkoumaného odlitku je závislá na použitém typu slévárenské formy a její počáteční teplotě (kovová forma studená 20 °C nebo přehřátá na teplotu 200 °C). V tabulce 6.7 jsou získané hodnoty doby tuhnutí zkoumaného odlitku pro jednotlivé zkoumané materiály, typy forem a teploty lití.

Na obr. 6-11 je grafická závislost doby tuhnutí zkoumaných odlitků tvaru válce odlitých do různých typů formy při různé teplotě lití. Jak je z grafu patrné, nejdéle tuhnou odlitky lité do formy z CT směsi při teplotě lití 550 °C. To je způsobeno tím, že forma z CT směsi velmi málo akumuluje teplo z odlitku dále do okolí. Pokud sledujeme dobu tuhnutí v jednotlivých typech forem při různých teplotách lití je vidět, že vyšší teplota lití prodlužuje dobu tuhnutí. Ze získaných hodnot je patrné, že doba tuhnutí pro čistý zinek je nižší než v případě slitin zinku. Porovnáme-li jednotlivé slitiny zinku vidíme, že rozdílný obsah mědi ovlivňuje některé vlastnosti slitin.

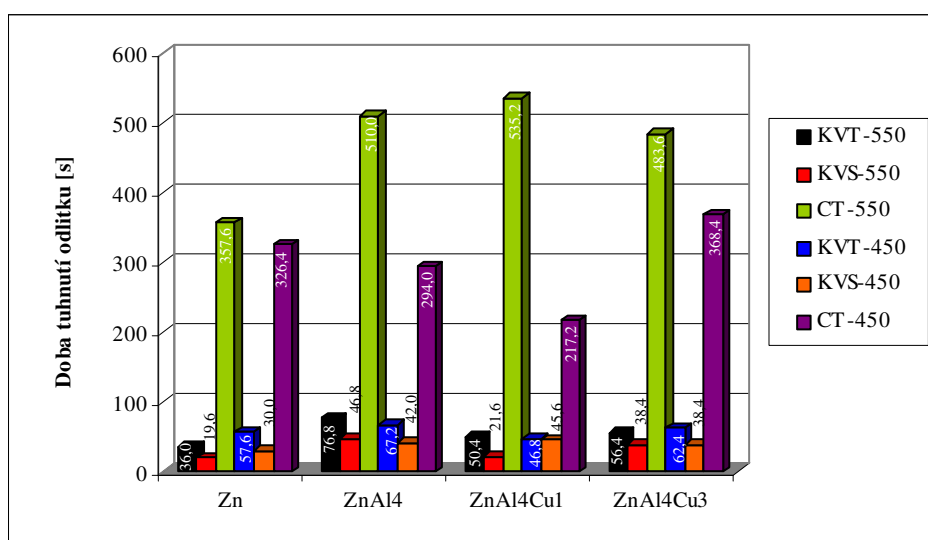
**Tabulka 6.7 Experimentálně stanovené doby tuhnutí odlitků při odlévání čistého zinku a jeho slitin**

Doba tuhnutí odlitku [s]					
Typ formy a průměr odlitku [mm]	Teplota lití [°C]	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
KVT - Ø 60	550	36	76,8	50,4	56,4
KVT - Ø 60	450	57,6	67,2	46,8	62,4
KVS - Ø 60	550	19,6	46,8	21,6	38,4
KVS - Ø 60	450	30	42	45,6	38,4
CT - Ø 60	550	357,6	510	535,2	483,6
CT - Ø 60	450	326,4	294	217,2	368,4

*Poznámka: KVT - kovová forma teplá (o teplotě 200 °C), KVS - kovová forma studená (o teplotě 20 °C), CT - forma z CT směsi.*

Nejdelší čas 535,2 [s] tuhnutí zkoumaného odlitku vykazuje slitina ZnAl4Cu1 odlitý do formy z CT směsi při teplotě lití 550 °C. Nejkratší čas 19,6 [s] vykazuje čistý zinek odlitý do kovové formy o teplotě 20 °C a teplotě lití 550 °C.

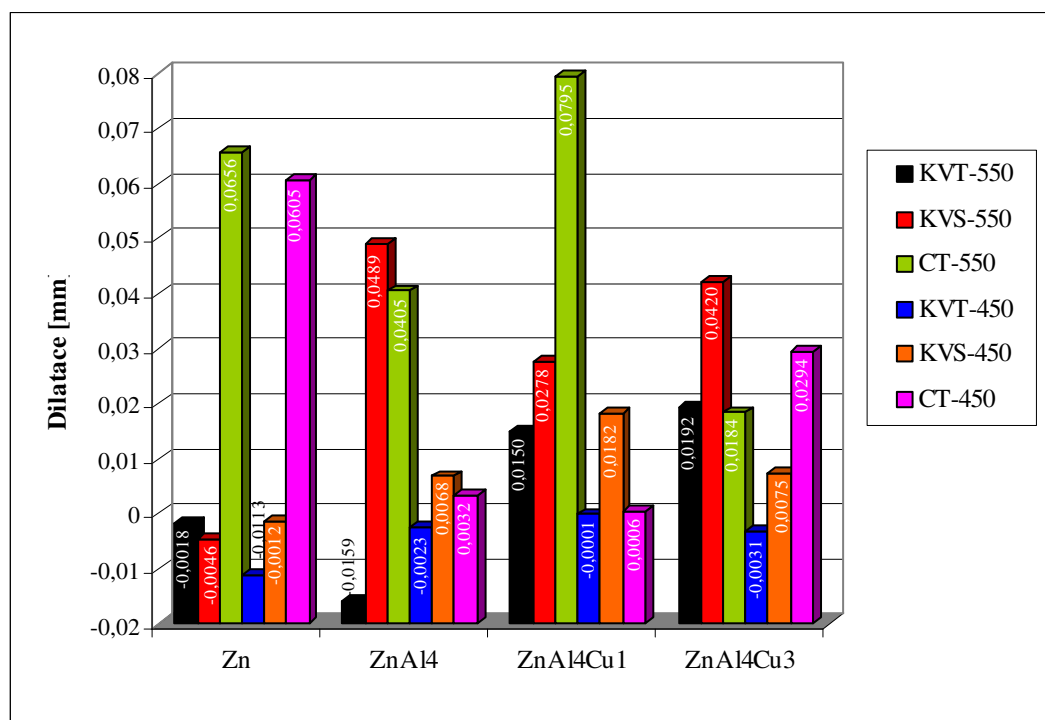
Vezmeme-li v úvahu velikost rozdílu při různých teplotách lití, např. slitina ZnAl4 odlita do kovové formy studené při teplotě 550 °C a 450°C vidíme, že doba tuhnutí nevykazuje vysoký rozdíl, jedná se o 4,8 [s]. Např. u slitiny ZnAl4Cu1 odlité při těchto dvou teplotách do formy z CT směsi, zde již rozdíl činí 318 [s]. Z toho je patrné, že zejména záleží na použitém typu formy, resp. její tepelné akumulaci schopnosti za stejných podmínek odlévání.



Obr. 6-11 Doba tuhnutí zkoumaných odlitků Ø 60 x 70 mm ze zinku a jeho slitin odlévaných do různých forem s teplotou lití 450 a 550 °C

#### D) Velikost dilatace zkoumaných odlitků při $T_{likv}$

Hodnotíme-li velikost dilatace zkoumaného odlitku při  $T_{likv}$  je z následujícího grafu, viz obr. 6-12, patrné, že největší nárůst dilatace 0,0795 [mm] zkoumaného odlitku vykazuje slitina ZnAl4Cu1 při tuhnutí ve formě z CT směsi a teplotě lití 550 °C. Zde je nutné říci, že se v prvopočátku jedná o nárůst rozměru zkoumaného odlitku, tzn. dochází k rozpínání odlitku. Nejmenší nárůst -0,0159 [mm] je u slitiny ZnAl4 při tuhnutí v kovové formě předeřáté na teplotu 200 °C a teplotě lití 550 °C. Zde již je dilatace záporná, tzn. dochází ke smrštění zkoumaného odlitku již při počátku tuhnutí. Záporná dilatace je patrná u odlitků litých do kovové formy předeřáté na teplotu 200 °C a při teplotě lití 450 °C. Dále byla pozorována záporná dilatace, tzn. smrštění odlitku při  $T_{likv}$  je také u odlitků z čitého zinku litých do kovové formy o teplotě 20 °C při obou teplotách lití (450 a 550 °C). Dále je záporná dilatace u slitiny ZnAl4 při lití do kovové formy předeřáté na teplotu 200 °C a při teplotě lití 550 °C. U ostatních měření byla dilatace při  $T_{likv}$  kladná, tudíž došlo nejprve k rozpínání odlitku vůči formě.

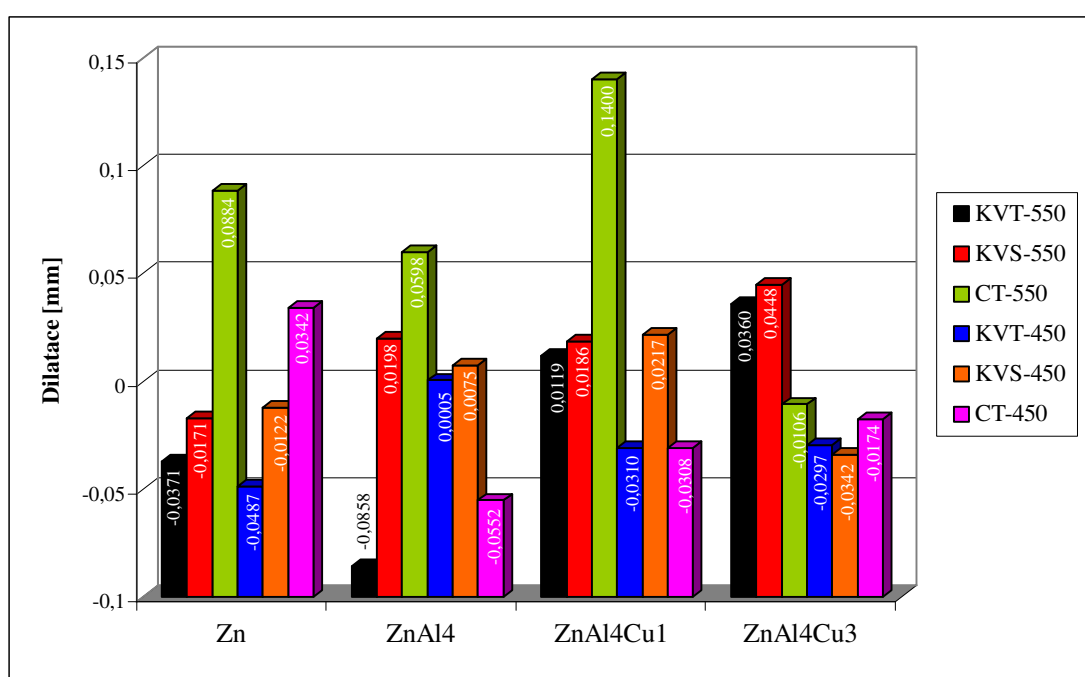


Obr. 6-12 Velikost dilatace zkoumaných odlitků Ø60 x 70 mm ze zinku a jeho slitin při  $T_{likv}$  odlévaných do různých forem s teplotou lití 450 a 550 °C

### E) Velikost dilatace zkoumaných odlitků při $T_{sol}$

Velikost dilatace zkoumaného odlitku při  $T_{sol}$ , viz obr. 6-13, v některých případech experimentálních měření s postupem tuhnutí a chladnutí odlitků neustále narůstá a dochází k rozpínání odlitku vůči formě (tzn. nebylo dosaženo maxima dilatace).

Nejvyšší nárůst rozměru odlitku při chladnutí je u slitiny ZnAl4Cu1 a to 0,14 [mm] při lití do formy z CT směsi a teplotě 550 °C. Největší dilataci (tj. již smrštění odlitku) -0,0858 [mm] vykazuje slitina ZnAl4 odlitá do kovové formy přehřáté na teplotu 200 °C a při teplotě lití 550 °C.

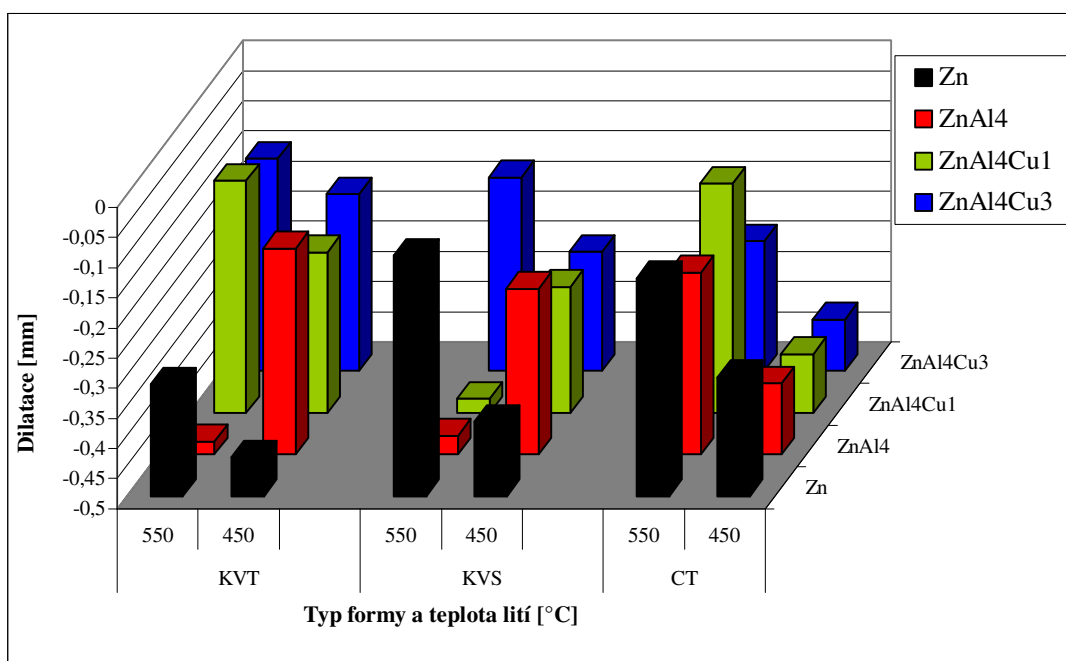


Obr. 6-13 Velikost dilatace zkoumaných odlitků Ø60 x 70 mm, ze zinku a jeho slitin, při  $T_{sol}$  odlévaných do různých forem s teplotou lití 450 a 550 °C

### F) Vliv teploty lití na rozměrové změny zkoumaných odlitků

Teplota lití má vliv na velikost dilatace zkoumaného odlitku. Tato veličina byla sledována na hodnotě dilatace odečtené při teplotě zkoumaného odlitku 100 °C. Při vyšší teplotě lití je patrný nárůst dilatace ve většině případů experimentálních měření. Výjimku tvoří slitina ZnAl4 odlitá do kovové formy jejíž počáteční teplota byla 20 °C a 200 °C, dále je tento fakt také u slitiny ZnAl4Cu1. Avšak jen v případě měření provedeného do kovové formy o počáteční teplotě 20 °C.

Největší rozdíl dilatací při teplotě odlitku 100 °C litých při teplotách 550 °C a 450 °C je u slitiny ZnAl4Cu1 a jeho hodnota je 0,2828 [mm]. Tato skutečnost se projevila při lití do formy z CT směsi. Nejmenší rozdíl dilatací při teplotě odlitku 100 °C litých při teplotách 550 °C a 450 °C je u slitiny ZnAl4Cu3 a jeho hodnota je 0,0589 [mm]. Toto bylo sledováno při lití do kovové formy přehřáté na teplotu 200 °C. Do tohoto hodnocení nebyly započítávány rozdíly dilatací, kdy dilatace při teplotě lití 450 °C byla vyšší než při teplotě lití 550 °C.



Obr. 6-14 Vliv teploty lití na velikost dilatace zkoumaných odlitků Ø60 x 70 mm ze zinku a jeho slitin při  $T_{likv}$  odlévaných do různých forem s teplotou lití 450 a 550 °C

### 6.3.2 Hodnocení II. etapy experimentálních měření

V této části byl sledován vliv průměru odlitku na velikost dilatace. Tato měření byla provedena do kovové formy s počáteční teplotou 20 °C a teplotou lití 550 °C. Kovová forma má vnější rozměry Ø 100 x 100 mm a vnitřní průměry odlitků byly Ø 60 mm, Ø 50 mm a Ø 40 mm. Z naměřených hodnot lze posuzovat tyto závislosti:

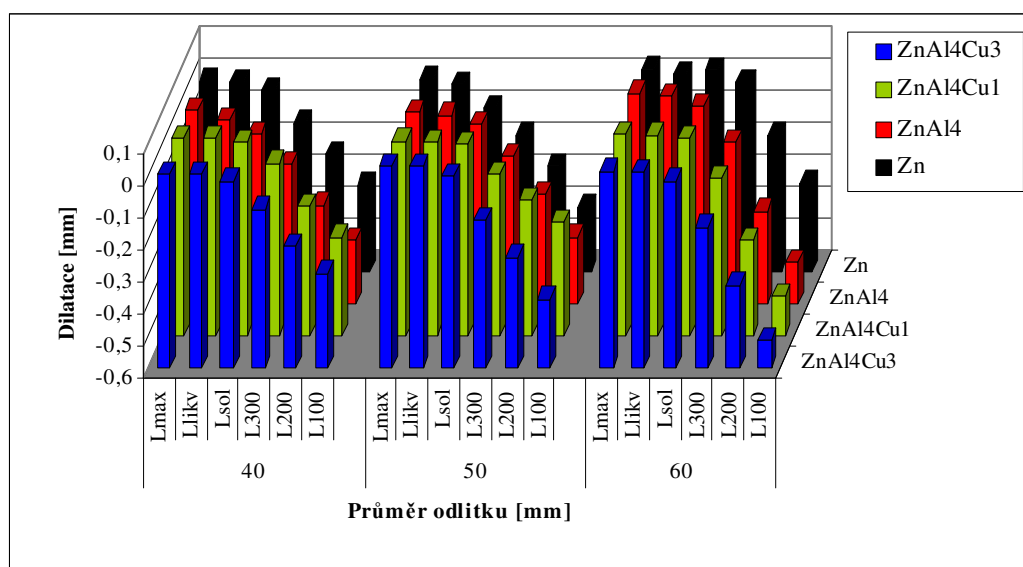
- vztah mezi rozměrovými změnami (dilatací) odlitku a průměrem odlitků;
- poměr dilatace ku průměru zkoumaného odlitku;
- celková doba tuhnutí zkoumaného odlitku;
- velikost dilatace zkoumaných odlitků při  $T_{likv}$ ;
- velikost dilatace zkoumaných odlitků při  $T_{sol}$ .

Průběhy dilatačních analýz získané z jednotlivých experimentálních měření jsou uvedeny v příloze č. 18.

#### A) Vztah mezi rozměrovými změnami (dilatací) a původním průměrem odlitků

Pro toto hodnocení byly ze získaných grafických závislostí experimentálních měření odečteny hodnoty dilatace při specifických teplotách odlitku, viz tabulka 6.5 a obr. 6-7.

Na obr. 6-15 je znázorněna grafická závislost dilatace čistého zinku a slitin zinku (ZnAl4, ZnAl4Cu1 a ZnAl4Cu3) v souvislosti s průměrem odlitku. Pro odlitek Ø 40 mm vykazuje největší dilataci -0,401 [mm] slitina ZnAl4 (při teplotě odlitku 100 °C), hodnota změny rozměru (smrštění) vztažena k původnímu průměru odlitku činí 1 %. Nejmenší dilatace, resp. smrštění, -0,292 [mm] vykazuje odlitek Ø 40x70 mm ze slitiny ZnAl4Cu1, tj. 0,73 % původního průměru odlitku. Pro odlitek Ø 50x70 mm vykazuje největší dilatace, resp. smrštění, o hodnotě -0,3946 [mm] čistý zinek. Hodnota dilatace vztažena k počátečnímu průměru odlitku činí smrštění o 0,65 %. Nejmenší dilataci, resp. smrštění, -0,246 [mm] vykazuje odlitek Ø 50x70 mm ze slitiny ZnAl4Cu1, hodnota smrštění je 0,58 % počátečního průměru odlitku. Pro odlitek Ø 60x70 mm vykazuje největší dilataci, resp. smrštění, -0,5151 [mm] slitina ZnAl4Cu3, hodnota dilatace vztažena k původnímu průměru odlitku činí 0,51 %. Nejmenší dilatace, resp. smrštění, -0,3203 [mm] pro odlitek Ø 60x70 mm vykazuje čistý zinek, jejíž hodnota je 0,54 % původního průměru odlitku.



Obr. 6-15 Grafická závislost dilatace tavenin při odlévání odlitků Ø 40 x 70 mm, Ø 50 x 70 mm, Ø 60 x 70 mm na jeho průměru ze zinku a jeho slitin na použitém kovové formy 20 °C, teplota lití 550 °C

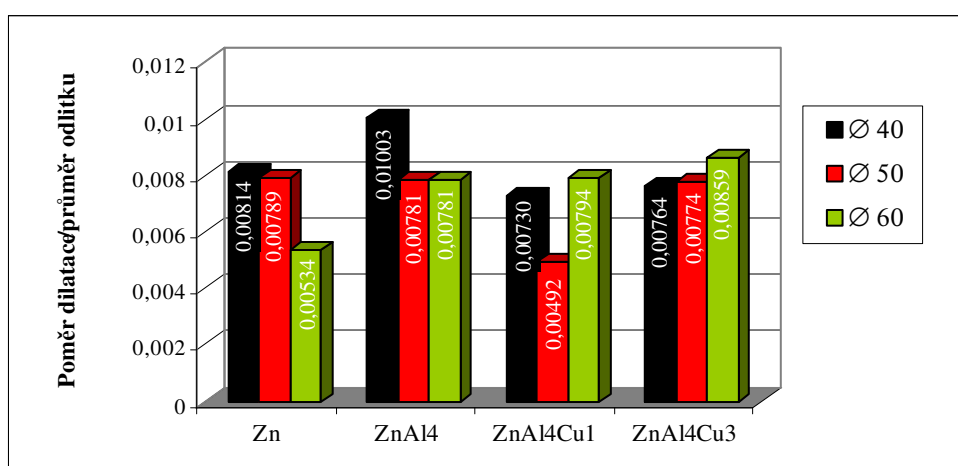
# B) Poměr dilatace odlitku při teplotě 100 °C a počátečního průměru odlitku

Poměr absolutní hodnoty dilatace k průměru zkoumaného odlitku byl vztažen k hodnotě dilatace chladnoucího zkoumaného odlitku odečtené při teplotě 100 °C. V tabulce 6.8 jsou hodnoty poměru dilatace a průměru odlitku pro jednotlivé zkoumané materiály, typy formy a teploty lití.

**Tabulka 6.8 Poměr absolutní hodnoty dilatace odlitku při teplotě 100 °C k jeho původnímu průměru**

Poměr $L_{100}/\varnothing$ [1]					
Typ formy a průměr odlitku [mm]	Teplota lití [°C]	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
KVS - $\varnothing$ 40	550	0,0081	0,0100	0,0073	0,0076
KVS - $\varnothing$ 50	550	0,0079	0,0078	0,0049	0,0077
KVS - $\varnothing$ 60	550	0,0053	0,0078	0,0079	0,0086

Na obr. 6-16 je graficky znázorněn poměr velikosti dilatace naměřené při teplotě 100 °C vztažený k průměru odlitku. Pro odlitek o  $\varnothing$  40 mm je tento poměr nejvyšší u slitiny ZnAl4, jeho hodnota je 0,01. Nejnižší poměr vykazuje slitina ZnAl4Cu1 jehož hodnota je 0,0073. Pro odlitek o  $\varnothing$  50 mm je nejvyšší hodnota poměru u čistého zinku a činí 0,0079; zatímco nejnižší hodnota je 0,0049 pro slitinu ZnAl4Cu1. U odlitku o  $\varnothing$  60 mm je nejvyšší hodnota poměru u slitiny ZnAl4Cu3 a jeho hodnota je 0,0086; naopak nejnižší hodnota je u čistého zinku 0,0053.



Obr. 6-16 Poměr dilatace odlévaných odlitků  $\varnothing$  40 x 70 mm,  $\varnothing$  50 x 70 mm,  $\varnothing$  60 x 70 mm k průměru odlitku při teplotě 100 °C ze zinku a jeho slitin; kovová forma 20 °C; teplota lití 550 °C



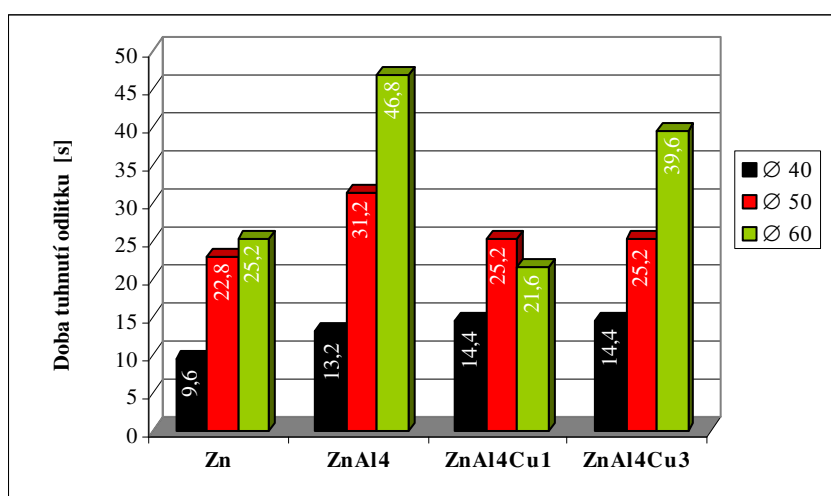
### C) Celková doba tuhnutí zkoumaných odlitků

Doba tuhnutí zkoumaného odlitku je závislá na použitém typu slévárenské formy a její počáteční teplotě (kovová forma 20 °C nebo přehřátá na teplotu 200 °C). V tabulce 6.9 jsou uvedeny naměřené hodnoty doby tuhnutí zkoumaných odlitků Ø 40 x 70 mm, Ø 50 x 70 mm, Ø 60 x 70 mm ze zinku a jeho slitin odlévaných do kovové formy o teplotě 20 °C.

**Tabulka 6.9 Doba tuhnutí odlitků Ø 40 x 70 mm, Ø 50 x 70 mm, Ø 60 x 70 mm ze zinku a jeho slitin odlévaných do kovové formy o teplotě 20 °C**

Doba tuhnutí odlitku [s]					
Typ formy a průměr odlitku [mm]	Teplota liti [°C]	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
KVS - Ø 40	550	9,6	13,2	14,4	14,4
KVS - Ø 50	550	22,8	31,2	25,2	25,2
KVS - Ø 60	550	25,2	46,8	21,6	39,6

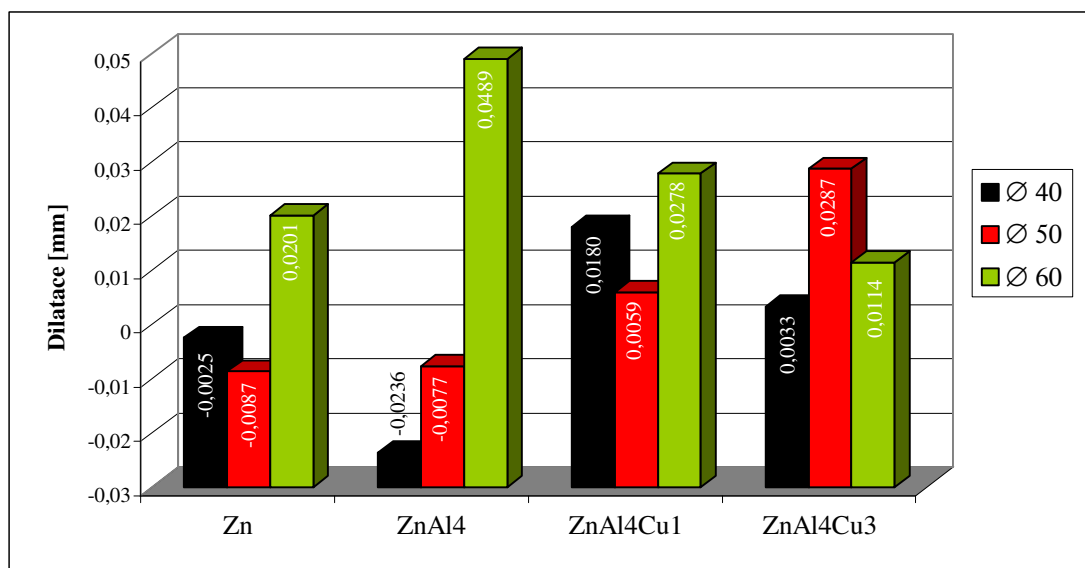
Na obr. 6-17 je zobrazena grafická závislost doby tuhnutí odlitku v závislosti na velikosti jejich průměru. Z uvedeného grafu je patrné, že se vzrůstajícím průměrem odlitku doba tuhnutí narůstá. Pouze u měření slitiny ZnAl4Cu1 byl zaznamenán pokles doby tuhnutí odlitku Ø 60 x 70 mm, který mohl být způsoben možnými nestejnými okolními podmínkami při měření. I z tohoto měření je patrné, že čistý zinek má nejkratší dobu tuhnutí odlitků různých průměrů.



Obr. 6-17 Doba tuhnutí zkoumaných odlitků Ø 40 x 70 mm, Ø 50 x 70 mm, Ø 60 x 70 mm ze zinku a jeho slitin odlévaných do kovové formy o teplotě 20 °C

#### D) Velikost dilatace sledovaných odlitků při $T_{likv}$

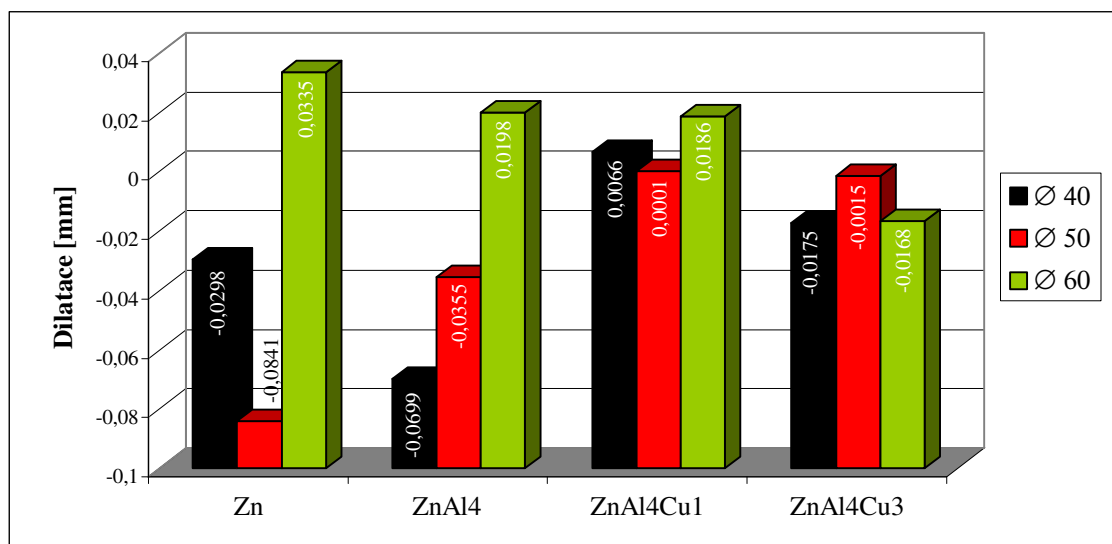
Na obr. 6-18 je grafické zobrazení velikosti dilatace zkoumaných tavenin při  $T_{likv}$ . Největší nárůst dilatace 0,0489 [mm] zkoumaného odlitku vykazuje slitina ZnAl4 pro  $\varnothing$  60 mm. Nejmenší nárůst -0,0236 [mm] je také u této slitiny ZnAl4, avšak pro odlitek  $\varnothing$  40 mm. Kladná dilatace, tj. nárůst rozměru odlitku, je patrná u odlitků ze slitin ZnAl4Cu1 a ZnAl4Cu3 u všech typů  $\varnothing$  odlitků.



Obr. 6-18 Velikost dilatace zkoumaných odlitků  $\varnothing$  40 x 70mm,  $\varnothing$  50 x 70 mm,  $\varnothing$  60 x 70 mm ze zinku a jeho slitin při  $T_{likv}$ ; odléváno do kovové formy o teplotě 20 °C

#### E) Velikost dilatace sledovaných odlitků při $T_{sol}$

Velikost dilatace při počátku chladnutí, viz obr. 6-19, vykazuje shodnou tendenci jako velikost dilatace při  $T_{likv}$ . Avšak zde je patrná nejvyšší hodnota dilatace u odlitku  $\varnothing$  60 x 70 mm z čistého zinku. Tato hodnota činí -0,0335 [mm]. Nejnižší hodnotu dilatace, tj. smrštění, vykazuje odlitek  $\varnothing$  50 x 70 mm též z čistého zinku. Tato hodnota je -0,0841 [mm].



Obr. 6-19 Velikost dilatace zkoumaných odlitků Ø 40 x 70 mm, Ø 50 x 70 mm, Ø 60 x 70 mm ze zinku a jeho slitin při  $T_{sol}$ ; odléváno do kovové formy o teplotě 20 °C; teplota lití 550 °C

## 6.4 Stanovení součinitele lineárního smrštění odlitku

Stanovení součinitele lineárního smrštění odlitků bylo provedeno dle známého vztahu (5.7) a aplikováno na podmínky rozměrových změn odlitku tvaru válce, viz vztah (6.2). Stanovené součinitele lineárního smrštění odlitků bylo provedeno na základě výsledků experimentů změn rozměrů odlitků Ø60 x 70 mm při jejich chladnutí. Vypočítané hodnoty součinitele lineárního smrštění sledovaných odlitků na bázi zinku jsou uvedeny v tabulce 6.10. Současně v této tabulce jsou uvedeny i vypočítané hodnoty součinitele objemového smrštění. Ty byly vypočítány na základě předpokladu, že objemové smrštění je trojnásobkem lineárního smrštění. Získané hodnoty byly porovnány s tabelovanými hodnotami teplotní roztažnosti čistého zinku a slitin zinku (ZnAl4, ZnAl4Cu1 a ZnAl4Cu3), které jsou uvedeny v příloze č. 14.

Výpočet součinitele lineárního smrštění odlitků ze zinku a jeho slitin byl proveden na základě experimentů s především s odlitky Ø 60 x 70 mm během chladnutí. To je například pro čistý zinek od teploty 420 °C. Pro jednotlivá měření byl stanoven součinitel lineární smrštitivosti, který např. pro odlitek z čistého zinku odlitého z teploty 550 °C do kovové formy (forma předeřhřátá na teplotu 200 °C) je  $16,7 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]$ . Vypočítané hodnoty součinitele lineárního smrštění jsou uvedeny tabulce 6.10. Hodnoty součinitele lineární smrštitivosti pro čistý zinek se pohybují od  $5,28 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]$  do  $25,5 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]$ . V odborné literatuře, např. [25] je tato hodnota uváděna



$29,2 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$ , v publikaci [14] je tato hodnota stanovena na  $39,7 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$ . Tabelované hodnotě pro čistý zinek podle [25] se nejvíce blíží hodnota  $25,5 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$  získaná při experimentálním měření do kovové formy o teplotě  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a průměru odlitku 40 mm. Hodnoty součinitele lineární smrštivosti pro slitinu zinku ZnAl4 se pohybují od  $9,4 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$  do  $35,3 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$ . V odborné literatuře [13] je tato hodnota uváděna  $27,4 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$ . Této tabelované hodnotě pro slitinu ZnAl4 odpovídá hodnota získaná při experimentálním měření do kovové formy o teplotě  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a průměru odlitku  $\varnothing 50 \times 70$  mm. Hodnoty součinitele lineárního smrštění pro slitinu zinku ZnAl4Cu1 se pohybují od  $6,8 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$  do  $27,5 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$ . V odborné literatuře [13] je uváděna hodnota  $27,4 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$ . Této tabelované hodnotě pro slitinu zinku ZnAl4Cu1 se nejvíce blíží hodnota  $27,5 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$  získaná při experimentálním měření do kovové formy o teplotě  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a průměru odlitku 60 mm. Hodnoty součinitele lineárního smrštění pro slitinu ZnAl4Cu3 se pohybují od  $8,8 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$  do  $30,2 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$ . V odborné literatuře [13] je uváděna hodnota  $27,8 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$ . Této tabelované hodnotě pro slitinu zinku ZnAl4Cu3 se nejvíce blíží hodnota  $27,1 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$  získaná při experimentálním měření do kovové formy o teplotě  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  odlitku  $\varnothing 50 \times 70$  mm.

**Tabulka 6.10 Vypočtené hodnoty součinitele lineárního smrštění odlitků ze zinku a jeho slitin**

Druh taveniny	Druh formy, teplota liti [°C], průměr odlitku [mm]	Teplota solidu [°C]	Naměřená hodnota lineárního smrštění [mm]	Vypočítaná hodnota součinitele lineárního smrštění [K <sup>-1</sup> ]	Vypočítaná hodnota součinitele objemového smrštění [K <sup>-1</sup> ]
Zn	KVT - 550 - Ø 60	413,39	-0,3142	16,7 · 10 <sup>-6</sup>	50,1 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - 550 - Ø 60	418,44	-0,1009	5,3 · 10 <sup>-6</sup>	15,8 · 10 <sup>-6</sup>
	CT - 550 - Ø 60	419,72	-0,1379	7,2 · 10 <sup>-6</sup>	21,6 · 10 <sup>-6</sup>
	KVT - 450 - Ø 60	419,36	-0,4354	22,7 · 10 <sup>-6</sup>	68,2 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - 450 - Ø 60	419,04	-0,376	19,6 · 10 <sup>-6</sup>	58,9 · 10 <sup>-6</sup>
	CT - 450 - Ø 60	420,71	-0,302	15,7 · 10 <sup>-6</sup>	47,1 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - Ø 40	419,22	-0,3256	<b>25,5 · 10<sup>-6</sup></b>	76,5 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - Ø 50	418,06	-0,3946	24,8 · 10 <sup>-6</sup>	74,4 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - Ø 60	411,06	-0,3203	17,2 · 10 <sup>-6</sup>	51,5 · 10 <sup>-6</sup>
ZnAl4	KVT - 550 - Ø 60	379,94	-0,4783	28,5 · 10 <sup>-6</sup>	85,4 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - 550 - Ø 60	381,43	-0,4686	27,8 · 10 <sup>-6</sup>	83,3 · 10 <sup>-6</sup>
	CT - 550 - Ø 60	381,3	-0,198	11,7 · 10 <sup>-6</sup>	35,2 · 10 <sup>-6</sup>
	KVT - 450 - Ø 60	380,37	-0,1581	9,4 · 10 <sup>-6</sup>	28,2 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - 450 - Ø 60	381,8	-0,2247	13,3 · 10 <sup>-6</sup>	39,9 · 10 <sup>-6</sup>
	CT - 450 - Ø 60	377,57	-0,3816	22,9 · 10 <sup>-6</sup>	68,7 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - Ø 40	383,93	-0,401	35,3 · 10 <sup>-6</sup>	105,9 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - Ø 50	384,88	-0,3903	<b>27,4 · 10<sup>-6</sup></b>	82,2 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - Ø 60	381,43	-0,4686	27,8 · 10 <sup>-6</sup>	83,3 · 10 <sup>-6</sup>
ZnAl4Cu <sub>1</sub>	KVT - 550 - Ø 60	380,03	-0,1148	6,8 · 10 <sup>-6</sup>	20,5 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - 550 - Ø 60	388,52	-0,4766	27,5 · 10 <sup>-6</sup>	82,6 · 10 <sup>-6</sup>
	CT - 550 - Ø 60	379,11	-0,1198	7,2 · 10 <sup>-6</sup>	21,5 · 10 <sup>-6</sup>
	KVT - 450 - Ø 60	381,14	-0,2337	13,9 · 10 <sup>-6</sup>	41,6 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - 450 - Ø 60	383,26	-0,2909	17,1 · 10 <sup>-6</sup>	51,3 · 10 <sup>-6</sup>
	CT - 450 - Ø 60	382,21	-0,4026	23,8 · 10 <sup>-6</sup>	71,3 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - Ø 40	384,35	-0,292	25,7 · 10 <sup>-6</sup>	77,0 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - Ø 50	388,02	-0,246	17,1 · 10 <sup>-6</sup>	51,2 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - Ø 60	388,52	-0,4766	<b>27,5 · 10<sup>-6</sup></b>	82,6 · 10 <sup>-6</sup>
ZnAl4Cu <sub>3</sub>	KVT - 550 - Ø 60	378,97	-0,1472	8,8 · 10 <sup>-6</sup>	26,4 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - 550 - Ø 60	381,08	-0,1787	10,6 · 10 <sup>-6</sup>	31,8 · 10 <sup>-6</sup>
	CT - 550 - Ø 60	381,42	-0,2842	16,8 · 10 <sup>-6</sup>	50,5 · 10 <sup>-6</sup>
	KVT - 450 - Ø 60	379,26	-0,2061	12,3 · 10 <sup>-6</sup>	36,9 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - 450 - Ø 60	387,59	-0,302	17,5 · 10 <sup>-6</sup>	52,5 · 10 <sup>-6</sup>
	CT - 450 - Ø 60	381,28	-0,4142	24,5 · 10 <sup>-6</sup>	73,6 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - Ø 40	383,94	-0,3056	27,0 · 10 <sup>-6</sup>	80,7 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - Ø 50	385,47	-0,3871	<b>27,1 · 10<sup>-6</sup></b>	81,4 · 10 <sup>-6</sup>
	KVS - Ø 60	383,95	-0,5151	30,2 · 10 <sup>-6</sup>	90,7 · 10 <sup>-6</sup>

*Poznámka: KVT - kovová forma teptá (teplota formy byla 200 °C), KVS - ková forma studená (teplota formy byla 20 °C), CT - forma z CT směsi.*



## **7. EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ TEPELNÝCH PROCESŮ PŘI TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ ODLITKŮ Z ČISTÉHO ZINKU A SLITIN ZINKU**

Řešení tepelných procesů mezi odlitkem a formou bylo sledováno při odlévání čistého zinku a slitin zinku ( $\text{ZnAl}_4$ ,  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_1$  a  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$ ) pro odlitek tvaru desky 220 x 160 x 20 mm v kovové formě (ČSN 19552) 220 x 220 x 220 mm. Odlitek tvaru desky byl zvolen proto, že na našem pracovišti je k dispozici příslušná ocelová forma a také měřicí zařízení pro sledování časových závislostí teploty v odlitku i ve formě. Současně byl předpoklad následného provedení simulačních výpočtů rozložení teplot v odlitku a ve formě při trojrozměrném sdílení tepla. Konstrukce dutiny ocelové formy pro odlitek tvaru desky 200 x 160 x 20 mm splňuje předpoklad, že tloušťka odlitku 6 až 10krát menší než jeho délka a výška.

Řešení výzkumu v této části práce bylo rozděleno do dvou etap:

1. etapa řešení - výpočet velikosti vzduchové vrstvy mezi odlitkem z čistého zinku a slitin zinku ( $\text{ZnAl}_4$ ,  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_1$  a  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$ ) a různě přehřátou kovovou formou 220 x 220 x 220 mm (materiál ČSN 19552).
2. etapa řešení – experimentální sledování teplotních polí ve výše uvedené ocelové formě a v tepelné ose odlitků z čistého zinku a slitin zinku.

Všechny experimenty byly provedeny v poloprovozních podmínkách na Katedře strojírenské technologie TU v Liberci, zde byly též dostupnými metodami vyhodnoceny. Dále bylo dbáno na to, aby okolní podmínky měření byly u všech experimentů stejné.

### **7.1 Výpočet velikosti vzduchové vrstvy mezi odlitkem a ocelovou formou**

Při gravitačním lití do kovových forem vzniká při tuhnutí odlitku mezi odlitkem a formou plynová vrstva (mezera neboli spára). Velikost této mezery je nutné znát při provádění případných následných simulačních výpočtů tuhnutí a chladnutí odlitků. Měření velikosti této plynové vrstvy je experimentálně velmi náročné a téměř neproveditelné. Z tohoto důvodu byla alespoň orientačně počítána velikost této plynové



vrstvy. Při výpočtu tloušťky plynové vrstvy se vycházelo z teoretických předpokladů, že ke vzniku plynové vrstvy dochází především v době tuhnutí a chladnutí odlitku.

V době tuhnutí odlitku dochází ke vzniku a narůstání ztuhlé vrstvy odlitku od líce formy. Tato vrstva současně smršťuje, avšak prohřívající se kovová forma se roztahuje. Počátek lineárního smrštění odlitku může nastat až v okamžiku vzniku dostatečně pevné ztuhlé vrstvy odlitku. Z toho vyplývá, že ke vzniku plynové vrstvy může dojít až po určité době tuhnutí odlitku. Tloušťku plynové vrstvy v době tuhnutí odlitku lze vyjádřit:

$$X_{PV_t} = X_{PV_o} + X_{PV_f}, \quad (7.1)$$

kde značí:  $X_{PV_o}$  - tloušťku plynové vrstvy způsobené smrštěním pevné kůry tuhnoucího odlitku;

$X_{PV_f}$  - tloušťku plynové vrstvy způsobené roztažením kovové formy.

Obecně obě hodnoty pravé strany rovnice (7.1) mohou být vzhledem k vytváření a růstu plynové vrstvy kladné i záporné. Hodnota  $X_{PV_o}$  může být např. záporná u odlitku ze slitiny vykazující předsmršťovací roztažení (litina s lupínkovým grafitem) nebo v důsledků jiných činitelů, např. vysokých metalostatických tlaků nebo u slitin soustavy Fe - C, kdy dochází k fázové transformaci  $\gamma \rightarrow \alpha$ .

Hodnota veličiny  $X_{PV_f}$  je záporná při chladnutí, resp. smršťování kokily.

Hodnoty obou veličin lze vypočítat:

$$X_{PV_o} = \alpha_{LS_o}^* \cdot (T_S - T_{ZK_{stř}}) \cdot X_O, \quad (7.2)$$

$$X_{PV_f} = \alpha_{LS_f}^* \cdot (T_{F_{stř}} - T_F) \cdot X_F, \quad (7.3)$$

kde značí:  $\alpha_{LS_o}^*$  - součinitel lineárního smrštění pevné kůry odlitku [ $K^{-1}$ ];

$\alpha_{LS_f}^*$  - součinitel lineární roztažnosti materiálu kovové formy;

$T_S$  - teplotu solidu odlévaného kovu;

$T_{ZK_{stř}}$  - střední teplotu ztuhlé kůry odlitku;

$T_{F_{stř}}$  - střední teplotu formy;

$T_F$  - počáteční teplotu formy;

$X_O$  - charakteristický rozměr odlitku (nejčastěji polovina odlitku);

$X_F$  - charakteristický rozměr formy.

V době chladnutí odlitku nastává další lineární smrštění. Tloušťka plynové vrstvy a tloušťka plynové vrstvy při chladnutí je dána analogickým vztahem jako je (7.1):

$$X_{PVch} = X_{PchO} + X_{PchF} \quad (7.4)$$

kde značí:  $X_{PchO}$  - tloušťku plynové vrstvy vyvolané smrštěním již ztuhlé části odlitku;

$X_{PchF}$  - tloušťku spáry vyvolané smršťováním kovové formy.

Současně lze psát:

$$X_{PchO} = \alpha_{so}^* \cdot (T_S - T_{Ostř}) \cdot X_O, \quad (7.5)$$

kde značí:  $\alpha_{so}^*$  - součinitel lineárního smrštění odlitku;

$T_{Ostř}$  - střední teplotu odlitku.

Při zanedbání vlivu smrštění kokily, lze na základě rovnic (7.1) a (7.4) lze stanovit celkovou hodnotu šíře plynové vrstvy ( $X_{PV}$ ) a lze psát:

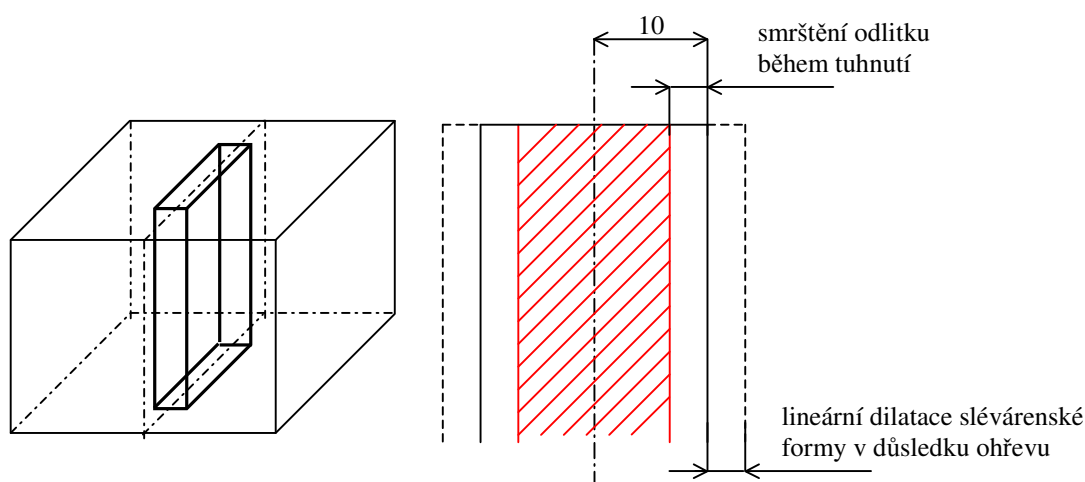
$$X_{PV} = X_{PVt} + X_{PVch}. \quad (7.6)$$

Jak je z uvedeného zřejmé, pokud sledujeme vznik plynové vrstvy mezi odlitkem a kovovou formou, pak je nutné brát v úvahu především tepelnou roztažnost formy, resp. změnu délky (v mém případě délkový rozměr dutiny formy - tj. 10 [mm]) a dále lineární smrštění vznikajícího odlitku po předchozím vyplnění této dutiny formy taveninou. Velikost smršťování odlitku závisí na mnoha faktorech, jak na fyzikálních vlastnostech použité slitiny, tak na technologických podmínkách výroby odlitku - teplotě a době lití, intenzitě odvodu tepla - resp. druhu slévárenské formy, konstrukci odlitku atd. Jak je obecně známo, tuhnutí odlitku probíhá po určitých vrstvách vzdalujících se od líce formy. Hodnoty součinitele lineárního smrštění, resp. roztažení kovů a slitin jsou uvedeny v příloze č. 14.



### 7.1.1 Výpočet velikosti vzduchové vrstvy mezi odlitkem tvaru desky a ocelovou formou předeřátou na určitou teplotu

Tato kapitola je zaměřena na fyzikální výpočet roztahující se formy a smršťování tuhnutí odlitku tvaru desky o rozměrech 220 x 160 x 20 mm. Byl předpoklad, že kovová forma je z oceli ČSN 19552 o rozměru 220 x 220 x 220 mm s dutinou. Z půdorysného schématu, viz obr. 7-1 je zřejmé, jak se sdílí teplo z tuhajícího odlitku, resp. jak budou probíhat dilatační změny smršťujícího se tuhajícího odlitku a ohřívající se formy. Při výpočtu byla provedena analýza, jak se mění plynová vrstva mezi odlitkem a formou, když forma má určitou teplotu.



Obr. 7-1 Půdorysné schéma změny lineárního rozměru odlitku a kovové formy (výchozí teplota formy je 20 °C)

Výpočty byly provedeny dle vztahů (7.2) a (7.3) a dále podle rovnice (7.5). Vypočítané hodnoty dilatace formy, smrštění odlitku a velikost plynové vrstvy pro jednotlivé zkoumané materiály (čistý zinek a slitiny zinku - ZnAl4, ZnAl4Cu1, ZnAl4Cu3) jsou uvedeny v následujících tabulkách 7.1 až 7.4. Grafická závislost získaných hodnot je na obr. 7-2.



**Tabulka 7.1 Výpočet hodnoty smrštění odlitku 220 x 160 x 20 mm z čistého zinku (vztaženo k jeho tepelné ose) a roztažení slévárenské formy při různých jejích teplotách**

Číslo	Střední teplota formy ( $T_{F \text{ stř.}}$ ) [°C]	Hodnota dilatace formy [mm]	Hodnota smrštění odlitku [mm]	Výsledná hodnota plynové vrstvy [mm]
1.	20	zanedbáno	0,122494	0,122494
2.	30	0,0127	0,122494	0,135144
3.	40	0,0253	0,122494	0,147794
4.	50	0,0380	0,122494	0,160444
5.	60	0,0506	0,122494	0,173094
6.	70	0,0633	0,122494	0,185744
7.	80	0,0759	0,122494	0,198394
8.	90	0,0886	0,122494	0,211044
9.	100	0,1012	0,122494	0,223694
10.	110	0,1139	0,122494	0,236344
11.	120	0,1265	0,122494	0,248994
12.	130	0,1392	0,122494	0,261644
13.	140	0,1518	0,122494	0,274294
14.	150	0,1645	0,122494	0,286944
15.	160	0,1771	0,122494	0,299594
16.	170	0,1898	0,122494	0,312244
17.	180	0,2024	0,122494	0,324894
18.	190	0,2151	0,122494	0,337544
19.	200	0,2277	0,122494	0,350194
20.	210	0,2404	0,122494	0,362844
21.	220	0,2530	0,122494	0,375494
22.	230	0,2657	0,122494	0,388144
23.	240	0,2783	0,122494	0,400794
24.	250	0,2910	0,122494	0,413444

**Poznámka:** Ukázka výpočtu tepelné dilatace formy:  $X_{PV f} = \alpha_{LR f} \cdot (T_{F \text{ stř.}} - T_F) \cdot X_F$ ;  $\alpha_{LR f} = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ;  $X_F = 10 \text{ mm}$ ;  $T_F = 20 \text{ °C}$ .

Smrštění tuhnuícího a chladnoucího odlitku:  $X_{PV o} = \alpha_{LS o} \cdot (T_S - T_{20}) \cdot X_O$ ;  $\alpha_{LS o} = 29,5 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ ;  $X_O = 10 \text{ mm}$ . Smrštění slitin zinku se uvádí cca 1,1 až 1,6%.

**Tabulka 7.2 Výpočet hodnoty smrštění odlitku 220 x 160 x 20 mm ze slitiny ZnAl4 a roztažení slévárenské formy při různých jejích teplotách**

Číslo	Střední teplota formy ( $T_{F\text{ stř.}}$ ) [°C]	Hodnota dilatace formy [mm]	Hodnota smrštění odlitku [mm]	Výsledná hodnota plynové vrstvy [mm]
1.	20	zanedbáno	0,105353	0,105353
2.	30	0,0127	0,105353	0,118003
3.	40	0,0253	0,105353	0,130653
4.	50	0,0380	0,105353	0,143303
5.	60	0,0506	0,105353	0,155953
6.	70	0,0633	0,105353	0,168603
7.	80	0,0759	0,105353	0,181253
8.	90	0,0886	0,105353	0,193903
9.	100	0,1012	0,105353	0,206553
10.	110	0,1139	0,105353	0,219203
11.	120	0,1265	0,105353	0,231853
12.	130	0,1392	0,105353	0,244503
13.	140	0,1518	0,105353	0,257153
14.	150	0,1645	0,105353	0,269803
15.	160	0,1771	0,105353	0,282453
16.	170	0,1898	0,105353	0,295103
17.	180	0,2024	0,105353	0,307753
18.	190	0,2151	0,105353	0,320403
19.	200	0,2277	0,105353	0,333053
20.	210	0,2404	0,105353	0,345703
21.	220	0,2530	0,105353	0,358353
22.	230	0,2657	0,105353	0,371003
23.	240	0,2783	0,105353	0,383653
24.	250	0,2910	0,105353	0,396303



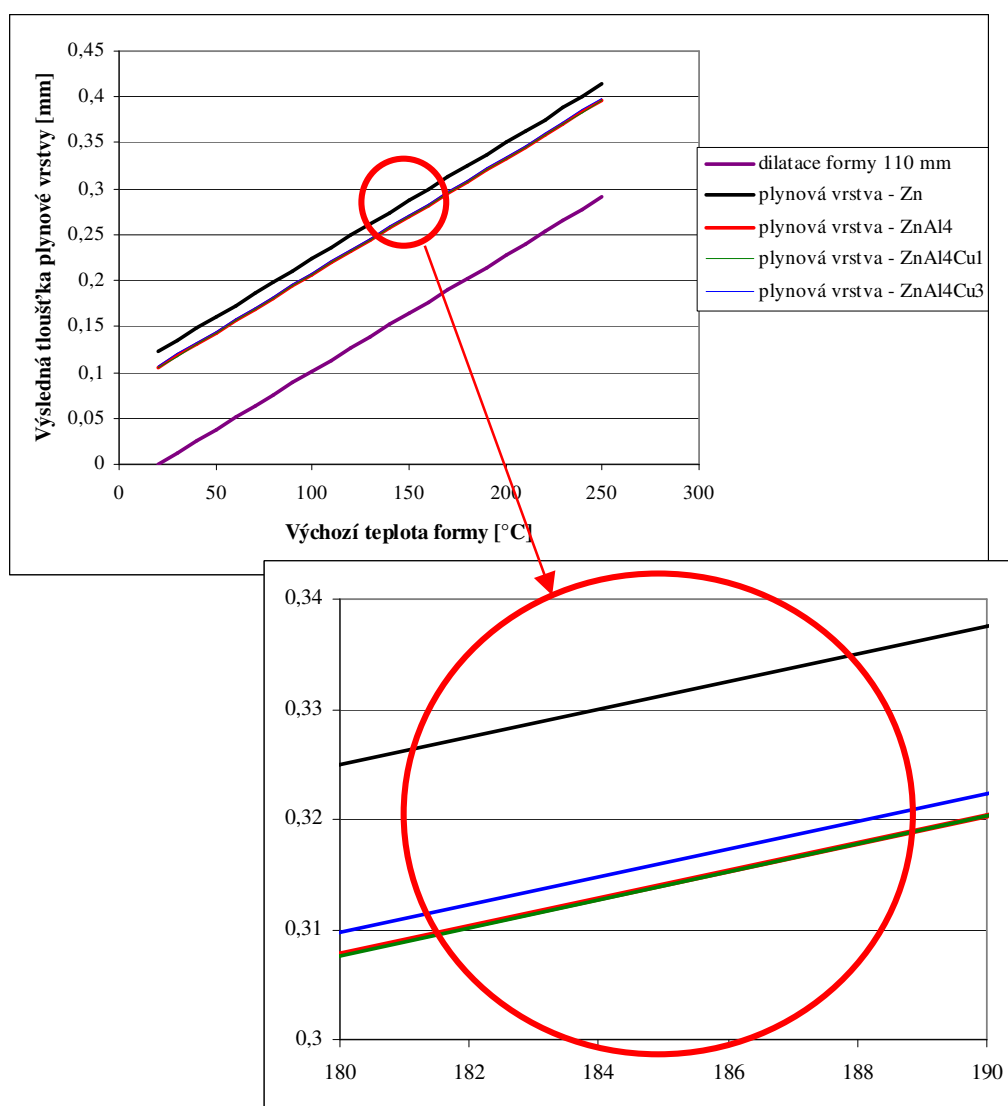
**Tabulka 7.3 Výpočet hodnoty smrštění odlitku 220 x 160 x 20 mm ze slitiny ZnAl4Cu1 a roztažení slévárenské formy při různých jejích teplotách**

Číslo	Střední teplota formy ( $T_{F\text{ stř}}$ ) [°C]	Hodnota dilatace formy [mm]	Hodnota smrštění odlitku [mm]	Výsledná hodnota plynové vrstvy [mm]
1.	20	zanedbáno	0,105216	0,105216
2.	30	0,0127	0,105216	0,117866
3.	40	0,0253	0,105216	0,130516
4.	50	0,0380	0,105216	0,143166
5.	60	0,0506	0,105216	0,155816
6.	70	0,0633	0,105216	0,168466
7.	80	0,0759	0,105216	0,181116
8.	90	0,0886	0,105216	0,193766
9.	100	0,1012	0,105216	0,206416
10.	110	0,1139	0,105216	0,219066
11.	120	0,1265	0,105216	0,231716
12.	130	0,1392	0,105216	0,244366
13.	140	0,1518	0,105216	0,257016
14.	150	0,1645	0,105216	0,269666
15.	160	0,1771	0,105216	0,282316
16.	170	0,1898	0,105216	0,294966
17.	180	0,2024	0,105216	0,307616
18.	190	0,2151	0,105216	0,320266
19.	200	0,2277	0,105216	0,332916
20.	210	0,2404	0,105216	0,345566
21.	220	0,2530	0,105216	0,358216
22.	230	0,2657	0,105216	0,370866
23.	240	0,2783	0,105216	0,383516
24.	250	0,2910	0,105216	0,396166



**Tabulka 7.4 Výpočet hodnoty smrštění odlitku 220 x 160 x 20 mm ze slitiny ZnAl4Cu3 a roztažení slévárenské formy při různých jejích teplotách**

Číslo	Střední teplota formy ( $T_{F\text{ stř}}$ ) [°C]	Hodnota dilatace formy [mm]	Hodnota smrštění odlitku [mm]	Výsledná hodnota plynové vrstvy [mm]
1.	20	zanedbáno	0,107308	0,107308
2.	30	0,0127	0,107308	0,119958
3.	40	0,0253	0,107308	0,132608
4.	50	0,0380	0,107308	0,145258
5.	60	0,0506	0,107308	0,157908
6.	70	0,0633	0,107308	0,170558
7.	80	0,0759	0,107308	0,183208
8.	90	0,0886	0,107308	0,195858
9.	100	0,1012	0,107308	0,208508
10.	110	0,1139	0,107308	0,221158
11.	120	0,1265	0,107308	0,233808
12.	130	0,1392	0,107308	0,246458
13.	140	0,1518	0,107308	0,259108
14.	150	0,1645	0,107308	0,271758
15.	160	0,1771	0,107308	0,284408
16.	170	0,1898	0,107308	0,297058
17.	180	0,2024	0,107308	0,309708
18.	190	0,2151	0,107308	0,322358
19.	200	0,2277	0,107308	0,335008
20.	210	0,2404	0,107308	0,347658
21.	220	0,2530	0,107308	0,360308
22.	230	0,2657	0,107308	0,372958
23.	240	0,2783	0,107308	0,385608
24.	250	0,2910	0,107308	0,398258



Obr. 7-2 Velikost plynové vrstvy při tuhnutí odlitku tvaru desky z čistého zinku a slitin zinku v kovové formě

## 7.2 Měření teplotních polí mezi odlitkem a formou

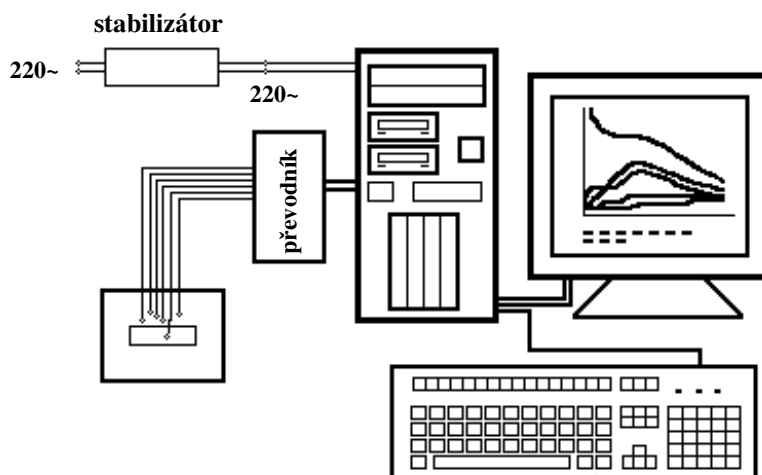
Hlavním záměrem těchto prováděných experimentů bylo naměření časových závislostí teplot v odlitku (220 x 160 x 20mm) a ve slévárenské formě (ČSN 19552). Měření bylo provedeno na měřícím zařízení, jehož popis je v následující kapitole 7.2.1, které bylo sestaveno na Katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci. Charakteristika použité slévárenské formy je uvedena v kapitole 7.2.2.

K měření teploty byly použity plášťované termočlánky NiCr-Ni Ø pláště 2 mm, délky 300 mm, výrobcem je švýcarská firma LEMO. Pro měření teploty v tepelné ose

odlitku tvaru desky byl použit termočlánek NiCr-Ni, průměr vodičů 2 mm s ochranou korundovou dvoukapilárou  $\varnothing 4 \times 15$  mm.

### 7.2.1 Popis měřicího zařízení pro zaznamenávání časových závislostí teplot ve formě a v odlitku

K měření časových závislostí teplot v odlitku a formě bylo použito měřicí zařízení sestavené na Katedře strojírenské technologie a průběžně inovované o nové mikroelektronické prvky. Skládá se z PC/AT Pentium s 16 čidlovým analogovým převodníkem PC LABDAS PCL 718 s multiplexorem PCLD 789. Daný převodník převádí přicházející analogový signál z termočlánků do digitálního tvaru a dále ho přivádí přes multiplexor k vyhodnocení do počítače vybaveného programem THERMAL, který byl vytvořen na naší katedře (KSP - TU Liberec). Do elektrického obvodu na napájecí straně počítače byl předřazen stabilizátor z důvodu stabilizace napětí proti výkyvům v elektrické síti, aby byla zajištěna správná funkčnost při snímání teplot. Skupinové schéma zařízení je na obr. 7-3. V příloze č. 19 je uvedena charakteristika použitého multiplexoru spolu s požadavky na měřicí zařízení.

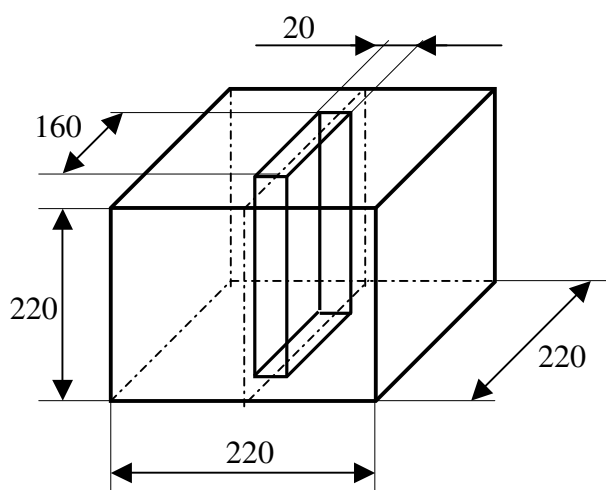


Obr. 7-3 Skupinové schéma měřicího zařízení

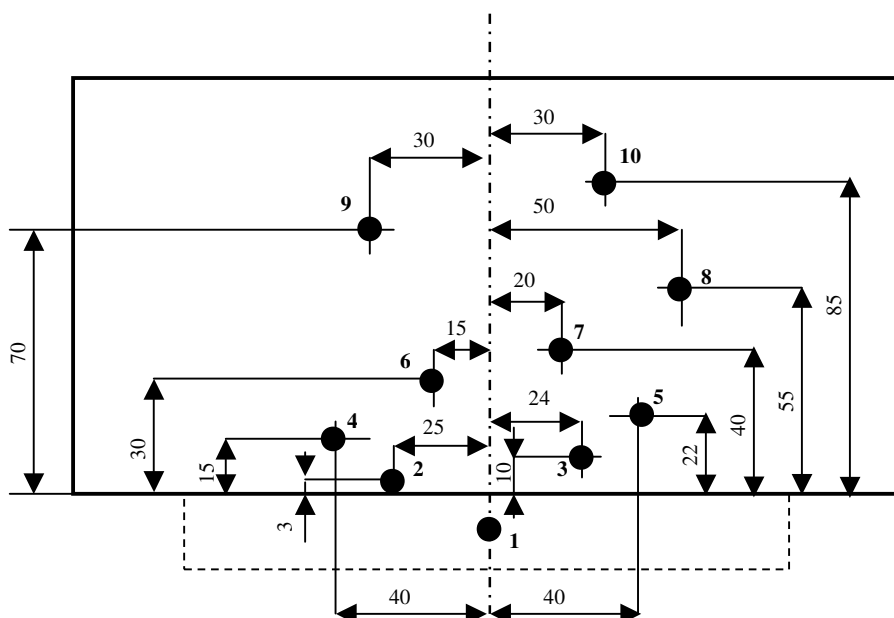
### 7.2.2 Charakteristika použité slévarenské formy

Pro odlévání byla použita kovová forma vyrobená z oceli ČSN 19 552. Tato ocel je typu Cr-Mo-Si-V a je určena pro práci za tepla. Chemické složení, struktura a další parametry této oceli jsou uvedeny v příloze č. 16. Forma je dělená a její rozměry jsou 220 x 220 x 220 mm, dutina formy je 220x 160 x 20 mm, viz obr. 7-4. V jedné půlce

formy jsou vyvrtány ve svislém směru díry  $\varnothing 2$  mm, které sahají do poloviny její výšky formy (tj. 110 mm). Tyto díry slouží pro zavedení termočlánků do formy a umožňují měření teploty, resp. sledování prohřátí formy v různých vzdálenostech od jejího líce. Jejich vzdálenosti děr od líce formy a jejich rozmístění je patrné z obr. 7-5. Na obr. 7-6 je ukázka formy připravené k odlévání.

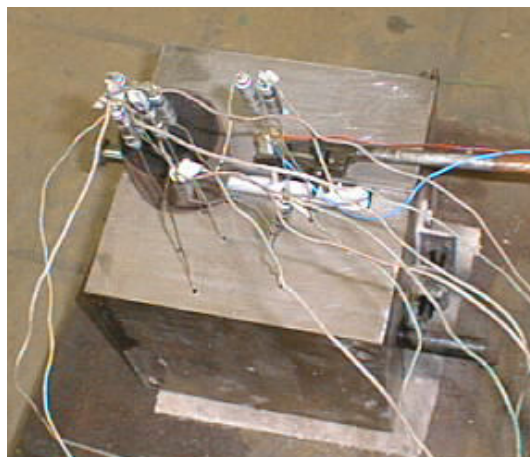


Obr. 7-4 Schéma ocelové formy s vyznačením hlavních rozměrů



Obr. 7-5 Schéma ocelové formy s vyznačením otvorů pro zavedení termočlánků





Obr. 7-6 Připravená ocelová forma spolu s termočlánky k odlévání

### 7.2.3 Popis provedených experimentální měření při sledování časových závislostí teplot v odlitku a v kovové formě

Experimentální měření provedená v této části disertační práce byla zaměřena na sledování časových závislostí teplot v tepelné ose zkoumaného odlitku a v určitých vzdálenostech od líce formy. Pro tyto experimenty byl použit čistý zinek a slitiny zinku. Chemické složení použitých slitin je uvedeno v tabulce 5.1. Měření časových závislostí teplot bylo sledováno za pomoci měřicího zařízení popsaného v kapitole 7.2.1. V tabulce 7.5 je uveden přehled jednotlivých experimentálních měření.

**Tabulka 7.5 Přehled prováděných experimentů při sledování časových závislostí teploty v odlitku a formě**

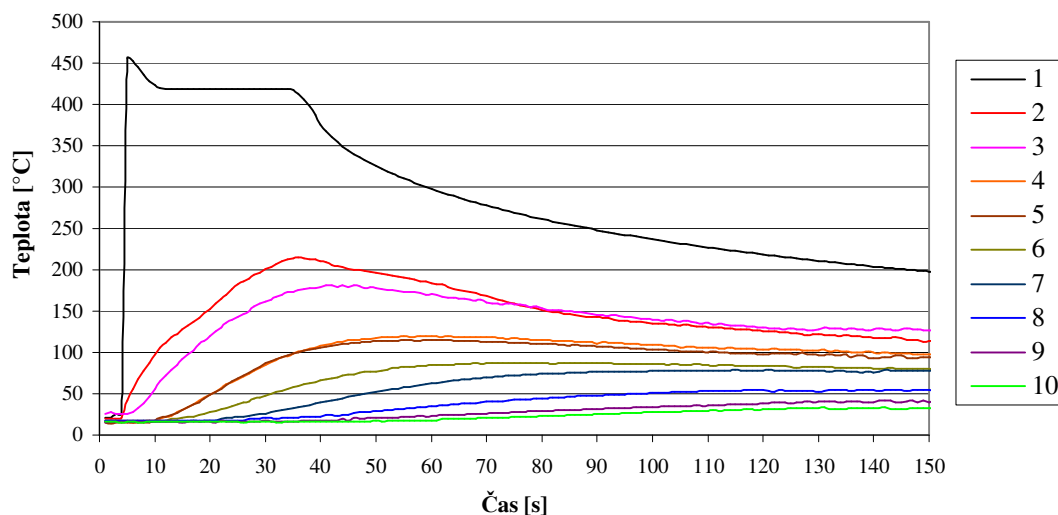
Číslo měření	Odléváný kov	Teplota formy [°C]	Teplota lité [°C]	Doba tuhnutí [s]	Čas dosažení nejvyšší teploty formy po odlití [s]
1	Čistý zinek	20	450	23	36
2.	Čistý zinek	250	450	70	49
3.	Slitina ZnAl4	20	450	41	42
4.	Slitina ZnAl4	250	450	104	66
5.	Slitina ZnAl4Cu1	20	450	80	43
6.	Slitina ZnAl4Cu1	250	450	109	67
7.	Slitina ZnAl4Cu3	20	450	49	30
8.	Slitina ZnAl4Cu3	250	450	111	67

Použité slévárenské slitiny, tj. čistý zinek a jeho slitiny (ZnAl4, ZnAl4Cu1, ZnAl4Cu3) byly taveny v grafitovém kelímku v odporové peci (výrobce BEZ

Bratislava). Před každým odléváním byla tavenina metalurgicky ošetřena, z jejího povrchu byla stažena struska a současně těsně před jejím odlitím byla měření teplota pomocí digitálního teploměru MIKROTERM (výrobce Závody měřicí a regulační techniky Polička), aby byly zajištěny pokud možno stejné podmínky experimentů. Poté byla ihned tavenina odlita do připravené dutiny slévárenské formy. Bylo dbáno, aby doba lití nepřesáhla 5 [s]. Pak byly sledovány časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a dále v určitých vzdálenostech od líce formy, které byly registrovány PC.

Získané hodnoty teplot a příslušných časů byly převedeny do MS Excel a z nich se vyhotovily grafické závislosti sledovaných teplot na čase. U experimentů, kde byla při odlévání použita forma o teplotě 20 °C, byla sledována časová závislost teplot po dobu 150 [s], u experimentů s použitím formy přehřáté na teplotu 200 °C byly sledovány časové závislosti teplot po dobu 250 [s]. Získané časové závislosti teplot pro odlitky tvaru desky 200 x 160 x 20 mm z čistého zinku a slitin zinku odlévané do formy o teplotě 20 °C jsou uvedeny na obr. 7-7 až obr. 7-10. Časové závislosti teplot sledované při odlévání do kovové formy přehřáté na teplotu 250 °C jsou uvedeny v příloze č. 20.

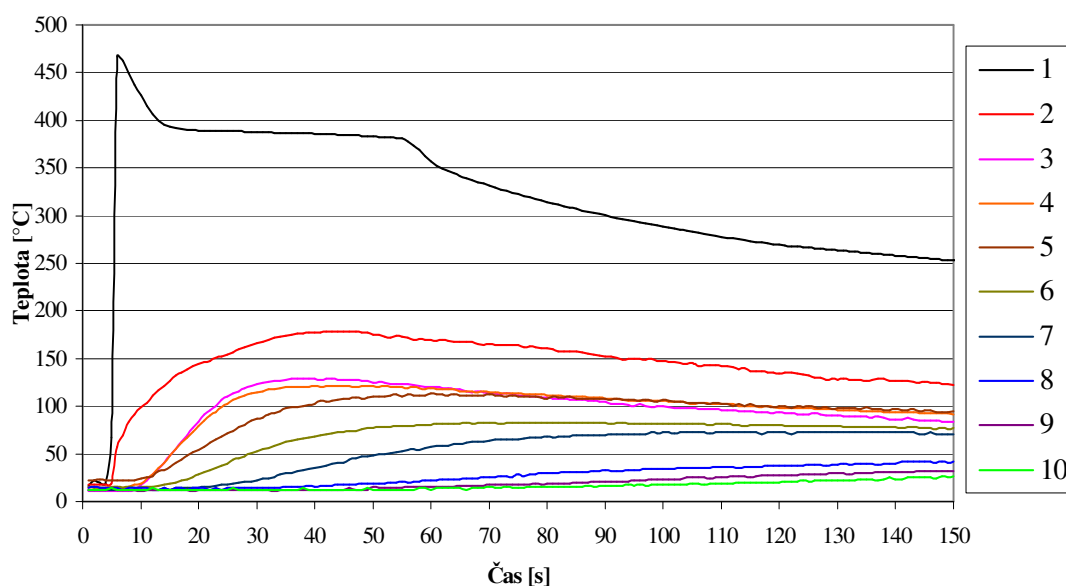
Čistý zinek, teplota formy 20°C



1 - tepelná osa odlitku; 2 - vzdálenost 3 mm od líce, 3 - vzdálenost 10 mm od líce; 4 - vzdálenost 15 mm od líce; 5 - vzdálenost 22 mm od líce; 6 - vzdálenost 30 mm od líce; 7 - vzdálenost 40 mm od líce; 8 - vzdálenost 55 mm od líce; 9 - vzdálenost 70 mm od líce; 10 - vzdálenost 85 mm od líce

Obr. 7-7 Časová závislost teplot v odlitku tvaru desky 200 x 160 x 20 mm a kovové formě 220 x 220 x 220 mm při odlévání čistého zinku; počáteční teplota formy 20 °C

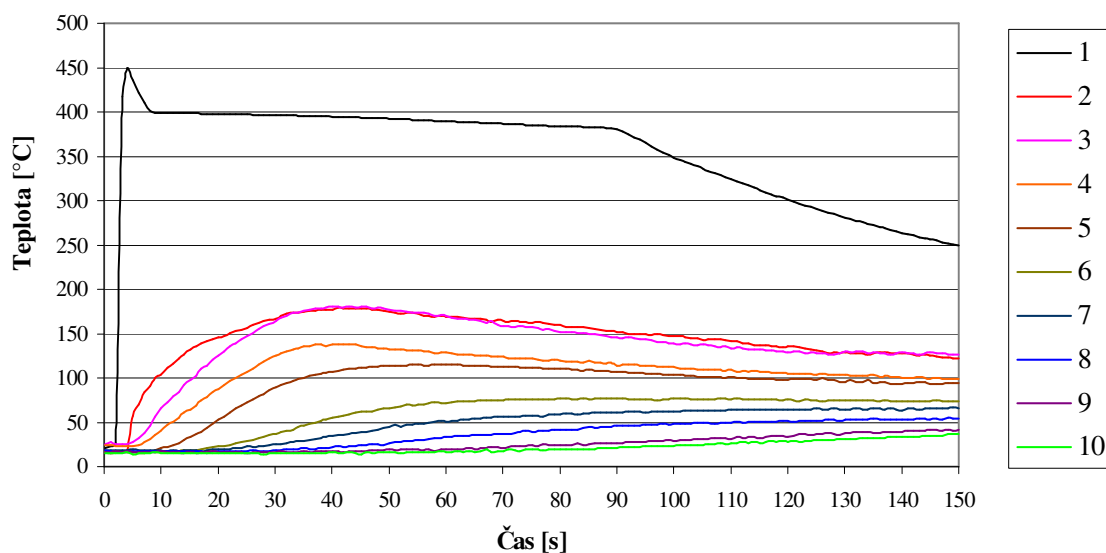
### ZnAl4, teplota formy 20°C



1 - tepelná osa odlitku; 2 - vzdálenost 3 mm od líce; 3 - vzdálenost 10 mm od líce; 4 - vzdálenost 15 mm od líce; 5 - vzdálenost 22 mm od líce; 6 - vzdálenost 30 mm od líce; 7 - vzdálenost 40 mm od líce; 8 - vzdálenost 55 mm od líce; 9 - vzdálenost 70 mm od líce; 10 - vzdálenost 85 mm od líce

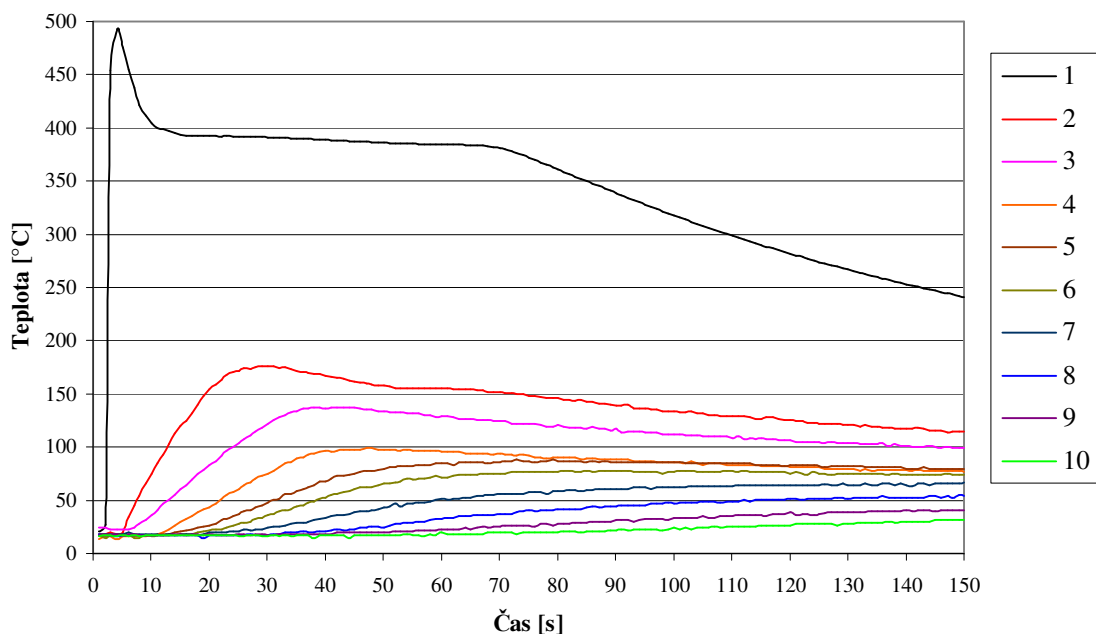
Obr. 7-8 Časová závislost teplot v odlitku tvaru desky 200 x 160 x 20 mm a kovové formě 220 x 220 x 220 mm při odlévání ZnAl4; počáteční teplota formy 20 °C

### ZnAl4Cu1, teplota formy 20°C



1 - tepelná osa odlitku; 2 - vzdálenost 3 mm od líce; 3 - vzdálenost 10 mm od líce; 4 - vzdálenost 15 mm od líce; 5 - vzdálenost 22 mm od líce; 6 - vzdálenost 30 mm od líce; 7 - vzdálenost 40 mm od líce; 8 - vzdálenost 55 mm od líce; 9 - vzdálenost 70 mm od líce; 10 - vzdálenost 85 mm od líce

Obr. 7-9 Časová závislost teplot v odlitku tvaru desky 200 x 160 x 20 mm a kovové formě 220 x 220 x 220 mm při odlévání ZnAl4Cu1; počáteční teplota formy 20 °C

**ZnAl4Cu3, teplota formy 20 °C**

1 - tepelná osa odlitku; 2 - vzdálenost 3 mm od líce; 3 - vzdálenost 10 mm od líce; 4 - vzdálenost 15 mm od líce; 5 - vzdálenost 22 mm od líce; 6 - vzdálenost 30 mm od líce; 7 - vzdálenost 40 mm od líce; 8 - vzdálenost 55 mm od líce; 9 - vzdálenost 70 mm od líce; 10 - vzdálenost 85 mm od líce

Obr. 7-10 Časová závislost teplot v odlitku tvaru desky 200 x 160 x 20 mm a kovové formě 220 x 220 x 220 mm při odlévání ZnAl4Cu3; počáteční teplota formy 20 °C

Tato experimentální měření byla dále doplněna o simulační výpočet, který je uvedený v následující části této disertační práce, tj. v kapitole 8.

### 7.3 Vyhodnocení měření teplotního pole odlitku a formy

Ze získaných časových závislostí teplot (v ose odlitku a určitých vzdálenostech od líce formy), viz obr. 7-7 až 7-10 a obr. viz příloha č. 19, jsou patrné okolnosti, které ovlivňují rozložení teplot v odlitku a formě při odlévání čistého zinku a jeho slitin.

Zde je možné sledovat, že u čistého zinku dochází k většímu prohřátí prvních vrstev formy a to až na teplotu 210 °C. Je to z toho důvodu, že teplota tání čistého zinku je vyšší než teploty likvidu a solidu jednotlivých slitin zinku. Časové závislosti teplotních křivek u jednotlivých slitin zinku vykazují jen nepatrné rozdíly. Teploty likvidu a solidu jednotlivých slitin zinku mají jen minimální rozdíl (asi 1 až 2 °C).

Průběh teplotních křivek při lití do kovové formy o teplotě 20 °C vykazuje strmější nárůst než je tomu u kovové formy předehřáté na teplotu 250 °C. Konečné



prohřátí určitých míst kovové formy při teplotě 20 °C vykazuje rozdíl až 100 °C, zatímco u kovové formy při teplotě 250 °C se jedná jen o rozdíl asi 50 °C. Teplo, které prostoupí z odlitku do kovové formy a prohřeje ji na určitou teplotu je v případě předeřáté kovové formy menší než je tomu v případě kovové formy studené. Nedochozí tak k značnému tepelnému namáhání materiálu formy. S tím souvisí i prodlužující se doba tuhnutí taveniny ve formě (viz tabulka 7.9).



## 8. SIMULAČNÍ VÝPOČTY TEPELNÝCH PROCESŮ PŘI TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ ODLITKŮ Z ČISTÉHO ZINKU A SLITIN ZINKU

V návaznosti na experimenty prováděné v kapitole 7, byly v rámci této doktorské práce provedeny simulační výpočty tepelných procesů při tuhnutí a chladnutí odlitků tvaru desky 220x160x20 mm z čistého zinku a jeho slitin (ZnAl<sub>4</sub>, ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>1</sub> a ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>), které byly odlévány do ocelové formy 220x220x220 mm a simulační výpočty byly provedeny při stejných slévárenských podmínkách jako experimenty, viz kapitola 7. Pro simulační výpočet byl použit slévárenský program WinCast/SIMTEC (RWP Aachen), který byl k dispozici na Katedře strojírenské technologie TU v Liberci. Součástí programu je databanka tepelně-fyzikálních veličin, kterou je možné doplňovat vlastními hodnotami potřebných fyzikálních a tepelných veličin.

### 8.1 Charakteristika simulačního programu WinCast/SIMTEC

Simulační program WinCast/SIMTEC je založen na řešení Fourierovy rovnice vedení tepla a rovnice sdílení tepla na povrchu tělesa dle Newtonova zákona. Pro technickou aplikaci jsou tyto dvě rovnice rozpracovány do tohoto tvaru:

$$\Phi(T) = \iiint_V \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dx \cdot dy \cdot dz - \iiint_V \left[ Q - c_p \rho \frac{T}{\partial t} \right] T \cdot dx \cdot dy \cdot dz + \\ + \frac{1}{2} \iint_S \{ \alpha(u, v) T^2 - q(u, v) T \} du \cdot dv \quad (8.1)$$

kde značí: V - objem tělesa;

S - plochu tělesa, kterou je předáváno teplo z odlitku do formy;

T - teplotu;

x, y, z - souřadnice;

$\rho$  - hustotu;

$c_p$  - měrnou tepelnou kapacitu za stálého tlaku;

Q - tepelný výkon vnitřních zdrojů;

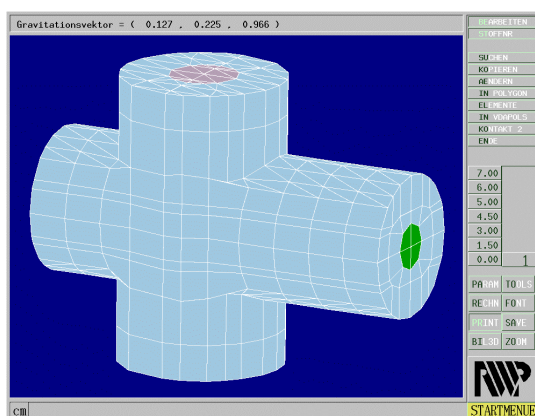
u, v - souřadnice sledovaného místa plochy;

$\alpha$  - součinitel přestupu tepla;

$q$  - hustotu tepelného toku.

Simulační výpočet je realizován ve třech krocích:

**Preprocessing** - tento krok simulačního výpočtu zahrnuje vytvoření vlastního geometrického nákresu odlitku nebo vytvoření 3D geometrie odlitku, viz obr. 8-1, nebo načtení geometrických dat odlitku vytvořených v externím programu CAD. V tomto výpočetním kroku je možné připojit k odlitku i vtokovou soustavu.



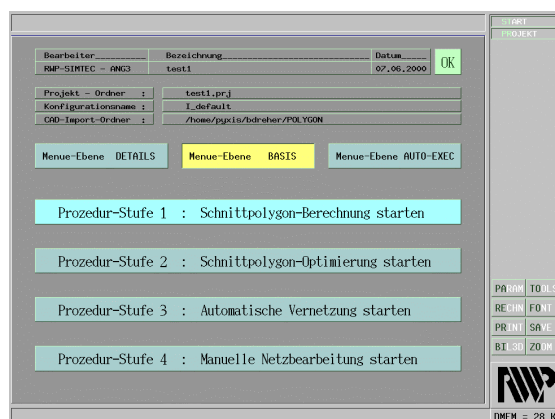
Obr. 8-1 Ilustrační zobrazení 3D nákresu simulovaného odlitku

**Mainprocessing** - tento krok je hlavní částí simulačního výpočtu a také celého programu. V této části programu probíhá vlastní simulační výpočet celého slévárenského procesu. Při simulačním výpočtu dochází k výpočtu změn teplot během celého procesu, popř. je možná napěťová analýza odlitku. V první fázi tohoto výpočtu probíhá načtení geometrických dat odlitku. A následně jsou z databáze tepelně-fyzikálních veličin vybrány hodnoty odpovídající příslušným materiálům (odlitku a formy). Druhá fáze tohoto výpočtu umožňuje zadání dalších parametrů a podmínek např. lící teplota taveniny, počáteční teplota formy, teplota okolí, latentní krystalizační teplo použitého materiálu, rychlost plnění formy, velikost časového intervalu a výpočtového kroku. K tomu v tomto programu složí uživatelský panel pro výběr a načtení těchto parametrů, viz obr. 8-2.

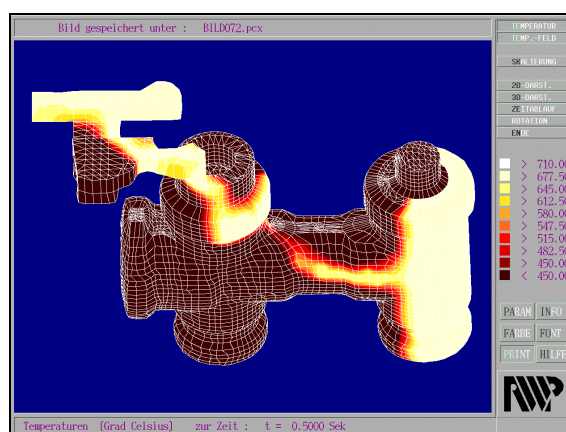
**Postprocessing** - je třetí krok výpočtu, při kterém dochází k zobrazení výsledků simulačního výpočtu. Jedná se nejčastěji o 3D barevné zobrazení výsledku simulačního procesu tuhnutí, viz obr. 8-3. Zde je možné zobrazit např. izotermy a křivky minimálních a maximálních teplot, viz obr. 8-4, zbytková napětí odlitku a deformace,



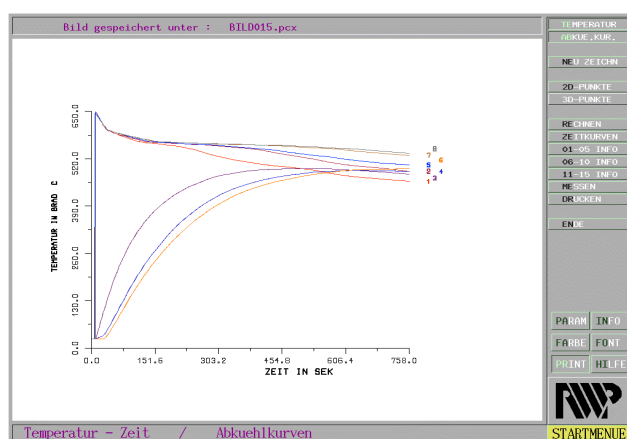
kritériální funkce (teplotní gradient, rychlost tuhnutí a jejich kombinace) a u některých případech lze také určit i strukturu odlitku.



Obr. 8-2 Panel pro volbu parametrů simulačního výpočtu



Obr. 8-3 Ilustrační zobrazení výsledku simulačního programu - zobrazení procesu tuhnutí



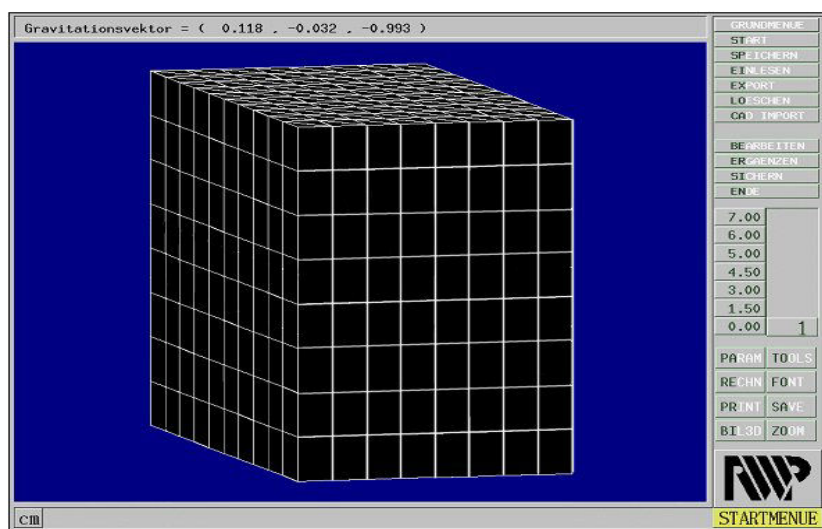
Obr. 8-4 Ilustrační zobrazení výsledku simulačního programu - zobrazení křivek teplot



## 8.2 Popis provedených simulačních výpočtů

V souvislosti s experimentálním měření tepelných procesů mezi odlitkem a formou, resp. sledováním časových závislostí teplot v tepelné ose odlitku a v různých místech kovové formy, viz kapitola 7 byl uskutečněn simulační výpočet uvedených časových závislostí teplot.

**I. krok simulačního výpočtu (preprocessing)** - pomocí grafické části programu WinCast - „FEM Mesh Generator ANG3“ byl nakreslen 3D model simulovaného odlitku tvaru desky (220 x 160 x 20 mm) s formou (220 x 220 x 220 mm), tj. stejný typ odlitku a formy jako v případě experimentálních měření. Na obr. 8-5 je zobrazen náčrtek formy ve 3D vytvořený v programu FEM Mesh Generator ANG3.



Obr. 8-5 Náčrtek formy v programu FEM Mesh Generator ANG3

Pomocí této grafické části programu byly také určeny polohy termočlánků, shodné s experimentálním měřením v kapitole 7.

**II. krok simulačního výpočtu (mainprocessing)** - „main processor TFB“ byla provedena charakteristika simulovaného odlitku. V této části kroku simulačního výpočtu byly zadány všechny hodnoty potřebných veličin, které jsou nutné k provedení odpovídajícího simulačního výpočtu. Některé tepelně-fyzikální veličiny potřebné pro simulační výpočet byly použity z databanky tohoto simulačního programu a hodnoty tepelně-fyzikálních veličin slitin zinku v závislosti na teplotě byly dodány pro výpočet jako vlastní data, viz příloha č. 21. Pro simulační výpočet jsou důležité



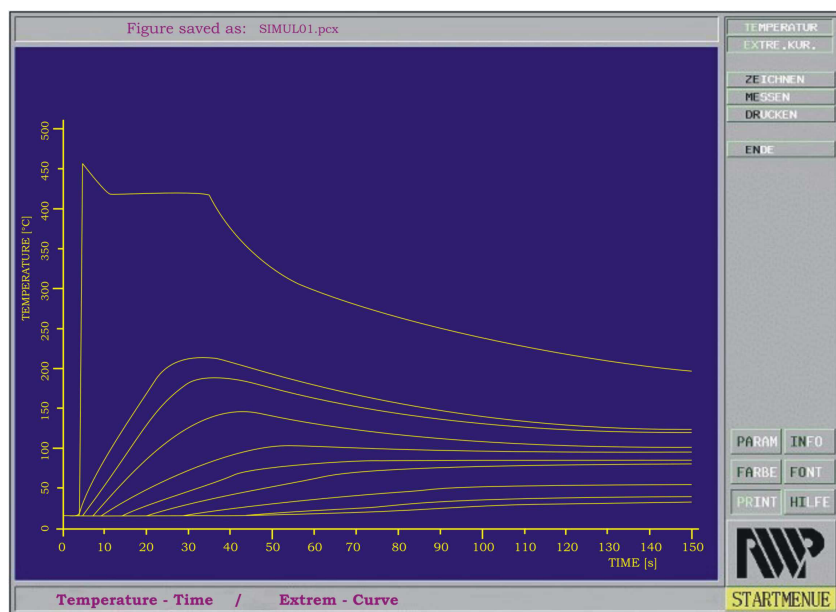
hodnoty součinitele prostupu tepla ( $\beta$ ) v závislosti na teplotě. Hodnoty tohoto součinitele v závislosti na teplotě zpřesňují výsledky simulačních výpočtů tuhnutí a chladnutí odlitek. Tyto hodnoty jsou pro systém: odlitek ze slitiny zinku a ocelová forma - odléváno gravitačním litím, uvedeny v tabulce 8.1.

**Tabulka 8.1 Hodnoty součinitele prostupu tepla ( $\beta$ ) v závislosti na teplotě**

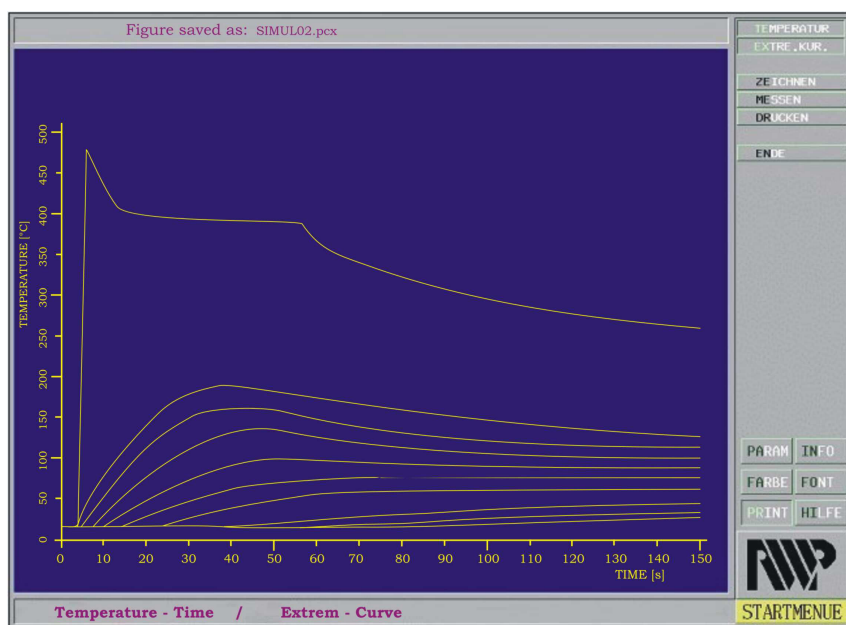
Teplota [°C]	Součinitel prostupu tepla $\beta$ [W .m <sup>-2</sup> . K <sup>-1</sup> ]							
	čistý zinek		ZnAl4		ZnAl4Cu1		ZnAl4Cu3	
	Teplota formy [°C]							
	20	250	20	250	20	250	20	250
20	70	70	60	60	60	50	60	55
100	100	100	95	100	90	100	90	80
200	200	180	180	200	170	150	170	150
300	250	200	280	250	265	200	260	230
400	1000	900	950	900	935	750	915	900
500	4000	3100	3850	2500	3810	1950	3800	2500
600	6000	4800	5550	3800	5520	3400	5500	3800
700	6000	4800	5550	3900	5520	3600	5500	3900
800	6000	4800	5550	3900	5520	3600	5500	3900

**III. krok simulačního výpočtu (postprocessing)** - na základě „EDA module“ bylo vytvořeno grafické zobrazení výsledků vlastního simulačního výpočtu, který probíhá v druhém kroku simulačního procesu.

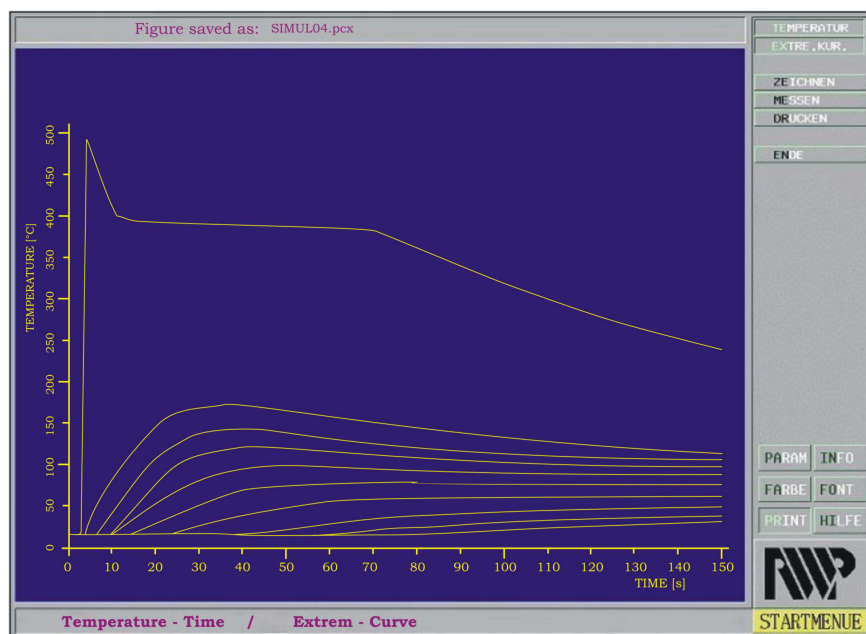
Zobrazení výsledků simulačního výpočtu tuhnutí a chladnutí odlitek ze zinku a jeho slitin odléváných do ocelové slévárenské formy bylo provedeno formou znázornění časových závislostí teplot v tepelné ose odlitku a v různých místech slévárenské formy. Na obr. 8-6 až 8-9 jsou uvedeny tyto závislosti pro čistý zinek a slitiny zinku, které byly odlévány do formy s počáteční teplotou 20 °C. Výsledky simulačních výpočtů, resp. zobrazení časových závislostí sledovaných teplot při gravitačním odlévání zinku a jeho slitin do ocelové formy předehřáté na teplotu 250 °C jsou uvedeny v příloze č. 20. Na těchto obrázcích označení jednotlivých křivek je shodné se značením, které je uvedeno na obr. 7.7, 7.8, atd.



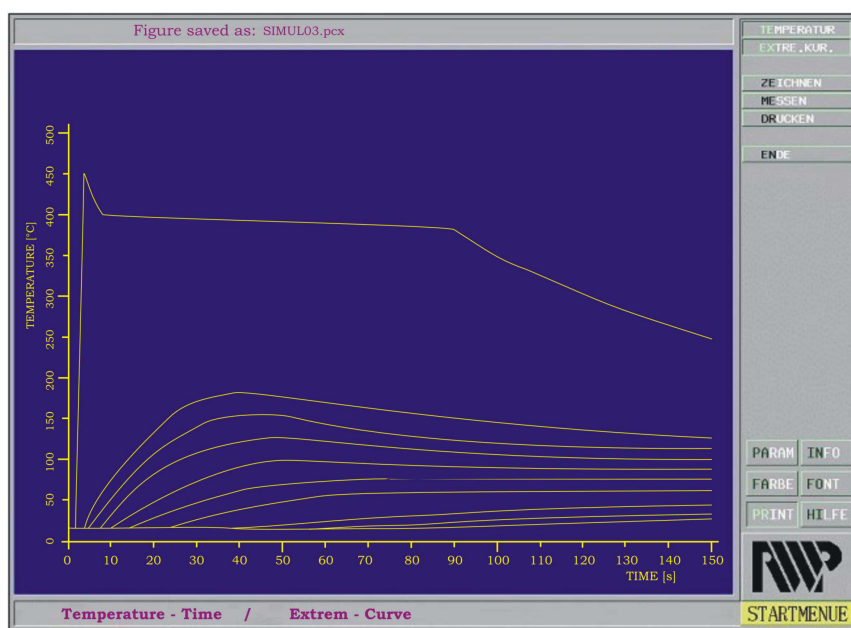
Obr. 8-6 Časová závislost teplot v odlitku tvaru desky 200 x 160 x 20 mm a kovové formě 220 x 220 x 220 mm při odlévání čistý zinek; počáteční teplota formy 20 °C (získáno simulačním výpočtem)



Obr. 8-7 Časová závislost teplot v odlitku tvaru desky 200 x 160 x 20 mm a kovové formě 220 x 220 x 220 mm při odlévání ZnAl<sub>4</sub>; počáteční teplota formy 20 °C (získáno simulačním výpočtem)



Obr. 8-8 Časová závislost teplot v odlitku tvaru desky 200 x 160 x 20 mm a kovové formě 220 x 220 x 220 mm při odlévání ZnAl4Cu1; počáteční teplota formy 20 °C (získáno simulačním výpočtem)



Obr. 8-9 Časová závislost teplot v odlitku tvaru desky 200 x 160 x 20 mm a kovové formě 220 x 220 x 220 mm při odlévání ZnAl4Cu1; počáteční teplota formy 20 °C (získáno simulačním výpočtem)

### 8.3 Vyhodnocení simulačních výpočtů teplotních polí odlitků a formy

Porovnáme-li výsledky simulovaných časových závislostí teplot v tepelné ose odlitku a v kovové formě s experimentálně naměřenými teplotními křivkami, viz kapitola 7, můžeme vidět, že získané průběhy teplot se téměř shodují. Odchyłky, které je možné zaznamenat, jsou jen v určitých dílčích detailech. Je nutné říci, že tato shoda je závislá na jednotlivých parametrech naměřených a simulovaných časových závislostí teplot. Mezi tyto parametry se řadí: doba a teplota lití, doba a teplota tuhnutí odlitku, charakter a průběh chladnutí odlitku. Grafické závislosti je nutno posuzovat jak celkově, tak i podle jednotlivých parametrů.

Při simulaci byly pečlivě posouzeny důležité okolnosti, které by mohly vést k odchylkám mezi simulací a naměřenými hodnotami. Bylo dbáno, aby odchylky časů, teplot a průběhy křivek byly co nejmenší. Simulační výpočet průběhu teplot se téměř shoduje s naměřeným průběhem teplot. Nepatrné odchylky jsou vidět v průběhu teplotních křivek v určitých místech kovové formy, kdy naměřené časové závislosti jsou mírně nerovné, zatím co u simulace je jejich průběh hladký. Průběh teplotních křivek je v případě slitin zinku téměř shodný, teplota likvidu a solidu jednotlivých typů slitin zinku vykazují jen minimální rozdíly. Z uvedeného je zřejmé, že je možné porovnávat simulované a naměřené průběhy teplotních křivek. Samozřejmě je třeba brát v úvahu i to, že při experimentálním měření měly na konečné výsledky vliv okolní podmínky měření (prodění, tuhnutí a chladnutí taveniny, sdílení tepla, vznikem vzduchové mezery a tím pro fyzikální popis složitými experimenty).

### 8.4 Souhrnné vyhodnocení naměřených a simulovaných hodnot

Naměřená data, uvedená v kapitole 7 a odpovídající výsledky simulačních výpočtů uvedené v této části disertační práce si vzájemně odpovídají, z hlediska charakteristiky použitých tavenin, materiálu formy, rozměrů odlitku a formy, včetně její počáteční teploty. To dokládá i následné souhrnné hodnocení.

Vyhodnocení bylo provedeno dle průběhu časových závislostí teplot v tepelné ose odlitku (u všech měření a simulací křivka č. 1) a časových závislostí teplot v jednotlivých místech formy (u všech měření a simulací křivky č. 2 až 10).

**Měření č. 1 (čistý zinek, teplota formy 20 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 4 [s] a teplota přehřátí taveny je 455 [°C]. Od tohoto okamžiku teplota klesá, odnímá se teplo přehřátí. Tuhnutí odlitku trvá 23 [s], při teplotě 418 [°C]. Poté již dochází k chladnutí odlitku, teplota klesá a v 70 [s] má odlitek teplotu 276 [°C].

*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka stoupá, v 35 [s] dosahuje svého maxima 215 [°C] a tím dochází k postupnému prohřívání formy. V okamžiku 70 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 168 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce ukazuje postupné prohřívání formy. Ve 40 [s] po odlití dosahuje svého maxima 180 [°C] a po dobu 10 [s] se drží na této teplotě, pak začíná klesat. V časovém okamžiku 70 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 160 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Tato křivka již nemá takový nárůst jako křivky 2 a 3, nicméně po odlití stoupá do 50 [s] na teplotu 120 [°C], na které se drží po dobu asi 20 [s] a poté začíná mírně a pomalu klesat. V okamžiku 70 [s] po odlití teplota této křivky činí 119 [°C].

*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Srovnatelný průběh jako křivka č. 4. Prohřívání tohoto místa formy je maximální v 50 [s] po odlití. Po dobu asi 30 [s] se teplota drží na této hodnotě, poté dochází k pomalému poklesu a v 70 [s] po odlití činí 113 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Od počátku lití mírný nárůst této teplotní křivky. Svého maxima dosahuje v 70 [s] po odlití a na této teplotě chvíli setrvává, poté začíná mírně a pozvolna klesat.

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] a nenaznačují výrazné prohřívání formy. Jejich nárůst je oproti počáteční teplotě o 20 až 30 °C.

**Simulační výpočet č. 1 (čistý zinek, teplota formy 20 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 5 [s] a teplota přehřátí taveny je 450 [°C]. Při teplotě 419 [°C] probíhá tuhnutí po dobu 20 [s]. Poté dochází k odnímání tepla z taveniny do formy, odlitek chladne, teplota klesá a v 75 [s] má odlitek teplotu 280 [°C].



*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Teplota ihned po odlití strmě stoupá a dosahuje teploty 220 [°C] ve 38 [s]. V 80 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 175 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce ukazuje postupné prohřívání formy. Ve 43 [s] po odlití dosahuje svého maxima 185 [°C] a chvíli se drží na této teplotě, pak začíná klesat. V časovém okamžiku 80 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 165 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Po odlití stoupá do 50 [s] na teplotu 120 [°C], na které se drží po dobu asi 18 [s] a poté začíná pomalu klesat. V 80 [s] po odlití teplota této křivky činí 122 [°C].

*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Prohřívání tohoto místa formy je maximální v 55 [s] po odlití. Po dobu asi 30 [s] se teplota drží na této hodnotě, poté dochází k pomalému poklesu a v 80 [s] po odlití činí 118 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Od počátku lití mírný nárůst této teplotní křivky. Maxima dosahuje v 70 [s] po odlití a na této teplotě chvíli setrvává, poté začíná mírně a pozvolna klesat, v 80 [s] po odlití má teplotu 110 [°C].

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

### **Měření č. 2 (čistý zinek, teplota formy 250 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 6 [s] a teplota přehřátí taveny je 453 [°C]. Od tohoto okamžiku teplota klesá, odnímá se teplo přehřátí. Tuhnutí odlitku trvá 70 [s], při teplotě 417 [°C]. Poté již dochází k chladnutí odlitku, teplota klesá a v 150 [s] má odlitek teplotu 340 [°C].

*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka stoupá, v 50 [s] dosahuje svého maxima 362 [°C] a tím dochází k postupnému prohřívání formy. V okamžiku 150 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 321 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce ukazuje postupné prohřívání formy. V 52 [s] po odlití dosahuje svého maxima 348 [°C], asi 10 [s] se drží na této teplotě, poté začíná klesat. V časovém okamžiku 150 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 312 [°C].



*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Tato křivka již nemá takový nárůst jako křivky 2 a 3, avšak po odlití stoupá do 68 [s] na teplotu 327 [°C], na které setrvává po dobu asi 20 [s] a poté začíná mírně a pomalu klesat. V okamžiku 150 [s] po odlití teplota této křivky činí 304 [°C].

*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Srovnatelný průběh jako křivka č. 4. Prohřívání tohoto místa formy je maximální v 65 [s] po odlití. Po dobu asi 15 [s] se teplota drží na teplotě 316 [°C], poté dochází k pomalému poklesu a v 150 [s] po odlití činí 302 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Od počátku lití mírný nárůst této teplotní křivky. Svého maxima dosahuje v 70 [s] po odlití a na této teplotě setrvává po dobu 50 [s], poté začíná mírně a pozvolna klesat. Ve 150 [s] po odlití má forma v těchto místech teplotu 295 [°C].

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] a nenaznačují výrazné prohřívání formy. Jejich nárůst je oproti počáteční teplotě o 10 až 30 °C.

### **Simulační výpočet č. 2 (čistý zinek, teplota formy 250 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 5 [s] a teplota přehřátí taveny je 450 [°C]. Od tohoto okamžiku teplota klesá, odnímá se teplo přehřátí. Tuhnutí odlitku trvá 75 [s], při teplotě 419 [°C]. Poté již dochází k chladnutí odlitku, teplota klesá a v 160 [s] má odlitek teplotu 335 [°C].

*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka stoupá, v 55 [s] dosahuje svého maxima 365 [°C]. V okamžiku 160 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 325 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce ukazuje postupné prohřívání formy. V 50 [s] po odlití dosahuje svého maxima 350 [°C], poté začíná klesat. V časovém okamžiku 160 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 310 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Po odlití stoupá do 70 [s] na teplotu 330 [°C] a poté začíná pomalu klesat. V okamžiku 160 [s] po odlití teplota této křivky činí 300 [°C].

*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Prohřívání tohoto místa formy je maximální v 70 [s] po odlití na teplotě 320 [°C], poté dochází k pomalému poklesu a ve 160 [s] po odlití činí 298 [°C].





*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Od počátku lití mírný nárůst této teplotní křivky. Svého maxima dosahuje v 75 [s] po odlití, na této teplotě setrvává a poté začíná pozvolna klesat. Ve 160 [s] po odlití má forma v těchto místech teplotu 290 [°C].

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

### **Měření č. 3 (slitina ZnAl4, teplota formy 20 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 5 [s] a teplota přehřátí taveny je 467 [°C]. Od tohoto okamžiku teplota klesá, odnímá se teplo přehřátí. Odlitek začíná tuhnou při teplotě likvidu 390 [°C] v 17 [s] po odlití. Tuhnutí odlitku trvá 41 [s] a teplota solidu je 381 [°C]. Poté již dochází k chladnutí odlitku, teplota klesá a v 70 [s] má odlitek teplotu 329 [°C].

*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka stoupá, v 41 [s] dosahuje svého maxima 178 [°C] a tím dochází k postupnému prohřívání formy. V okamžiku 70 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 164 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce ukazuje postupné prohřívání formy. Ve 35 [s] po odlití dosahuje svého maxima 129 [°C] a po dobu 10 [s] se drží na této teplotě, potom začíná klesat. V časovém okamžiku 70 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 114 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Tato křivka má podobný průběh jako křivka č. 3. Po odlití stoupá do 35 [s] na teplotu 120 [°C], na které se drží po dobu asi 20 [s] a poté začíná mírně a pomalu klesat. V okamžiku 70 [s] po odlití teplota této křivky činí 113 [°C].

*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Po odlití pozvolný nárůst na maximální teplotu 112 [°C] v 55 [s]. Po dobu asi 20 [s] se teplota drží na této hodnotě, poté dochází k pomalému poklesu a v 70 [s] po odlití činí 112 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Od počátku lití mírný nárůst této teplotní křivky. Svého maxima dosahuje v 66 [s] po odlití a to teploty 82 [°C], na které setrvává, poté začíná mírně a pozvolna klesat.



*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] a nenaznačují výrazné prohřívání formy. Jejich nárůst je oproti počáteční teplotě o 5 až 20 °C.

### **Simulační výpočet č. 3 (slitina ZnAl4, teplota formy 20 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 5 [s] a teplota přehřátí taveny je 460 [°C]. Odlitek začíná tuhnout při teplotě likvidu 387 [°C] v 17 [s] po odlití po dobu 40 [s], teplota solidu je 382 [°C]. Poté již dochází k chladnutí odlitku, teplota klesá a v 80 [s] má odlitek teplotu 330 [°C].

*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka stoupá a dosahuje svého maxima 178 [°C] ve 45 [s]. V okamžiku 80 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 170 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce. Ve 40 [s] po odlití dosahuje svého maxima 130 [°C], drží se na této teplotě a potom začíná klesat. V časovém okamžiku 80 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 110 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Po odlití stoupá do 30 [s] na teplotu 125 [°C], poté začíná pomalu klesat. V okamžiku 80 [s] po odlití teplota této křivky činí 105 [°C].

*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Po odlití pozvolný nárůst na maximální teplotu 115 [°C] v 60 [s], drží se na této hodnotě, poté dochází k pomalému poklesu a v 80 [s] po odlití činí 100 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Svého maxima dosahuje v 70 [s] po odlití a to teploty 85 [°C], kde setrvává, poté začíná mírně klesat.

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

### **Měření č. 4 (slitina ZnAl4, teplota formy 250 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 6 [s] a teplota přehřátí taveny je 454 [°C]. Od tohoto okamžiku teplota klesá, odnímá se teplo přehřátí. Odlitek začíná tuhnout při teplotě likvidu 388 [°C] ve 20 [s] po odlití. Tuhnutí odlitku trvá 104 [s] a teplota solidu je 370 [°C]. Poté již dochází k chladnutí odlitku, teplota klesá a ve 150 [s] má odlitek teplotu 341 [°C].



*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka stoupá, v 66 [s] dosahuje svého maxima 361 [°C] a tím dochází k postupnému prohřívání formy. V okamžiku 150 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 335 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce ukazuje postupné prohřívání formy. V 55 [s] po odlití dosahuje svého maxima 344 [°C], chvíli setrvává na této teplotě, poté začíná klesat. V časovém okamžiku 150 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 326 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Tato křivka již nemá takový nárůst jako křivky 2 a 3, avšak po odlití stoupá do 60 [s] na teplotu 327 [°C], na které setrvává po dobu asi 40 [s] a poté začíná mírně a pomalu klesat. V okamžiku 150 [s] po odlití teplota této křivky činí 317 [°C].

*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Srovnatelný průběh jako křivka č. 4. Prohřívání tohoto místa formy je maximální v 72 [s] po odlití. Po dobu asi 10 [s] se teplota drží na 323 [°C], poté dochází k pomalému poklesu a v 150 [s] po odlití činí 312 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Od počátku lití mírný nárůst této teplotní křivky. Svého maxima dosahuje v 72 [s] po odlití a na teplotě 305 [°C] setrvává po dobu 70 [s], poté začíná mírně a pozvolna klesat. Ve 150 [s] po odlití má forma v těchto místech teplotu 303 [°C].

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] a nenaznačují výrazné prohřívání formy. Jejich nárůst je oproti počáteční teplotě o 17 až 40 °C.

#### **Simulační výpočet č. 4 (slitina ZnAl4, teplota formy 250 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 5 [s] a teplota přehřátí taveny je 460 [°C]. Odlitek začíná tuhnout při teplotě likvidu 387 [°C] ve 20 [s] po odlití po dobu 110 [s], teplota solidu je 382 [°C]. Poté již dochází k chladnutí odlitku, teplota klesá a ve 160 [s] má odlitek teplotu 345 [°C].

*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka prudce stoupá, svého maxima dosahuje na teplotě 361 [°C] v časovém okamžiku 70 [s]. Ve 160 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 340 [°C].



*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce. Maxima dosahuje v 60 [s] po odlití na teplotě 344 [°C], chvíli setrvává a poté začíná klesat. V časovém okamžiku 160 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 320 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Po odlití stoupá do 65 [s] na teplotu 330 [°C], na které setrvává a poté začíná pomalu klesat. V okamžiku 160 [s] po odlití teplota této křivky činí 320 [°C].

*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Prohřívání tohoto místa formy je maximální v 70 [s] po odlití na teplotě 323 [°C], poté dochází k pomalému poklesu a v 160 [s] po odlití činí 310 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Svého maxima dosahuje v 65 [s] po odlití a na teplotě 300 [°C]. Ve 160 [s] po odlití má forma v těchto místech teplotu 300 [°C].

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

#### **Měření č. 5 (slitina ZnAl4Cu1, teplota formy 20 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 4 [s] a teplota přehřátí taveny je 450 [°C]. Od tohoto okamžiku teplota klesá, odnímá se teplo přehřátí. Odlitek začíná tuhnou při teplotě likvidu 398 [°C] v 10 [s] po odlití. Tuhnutí odlitku trvá 80 [s] a teplota solidu je 381 [°C]. Poté již dochází k chladnutí odlitku, teplota klesá a ve 110 [s] má odlitek teplotu 323 [°C].

*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka stoupá, ve 40 [s] dosahuje svého maxima 178 [°C] a tím dochází k postupnému prohřívání formy. V okamžiku 110 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 142 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce ukazuje postupné prohřívání formy. Ve 40 [s] po odlití dosahuje svého maxima 180 [°C] a po dobu 10 [s] se drží na této teplotě, pak začíná klesat. V časovém okamžiku 110 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 135 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Tato křivka má své maximum ve 37 [s] po odlití na teplotě 138 [°C], na které chvíli setrvává a poté začíná pomalu klesat. V okamžiku 110 [s] po odlití teplota této křivky činí 109 [°C].



*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Prohřívání tohoto místa formy je maximální v 50 [s] po odlití na teplotě 115 [°C]. Po dobu asi 20 [s] se teplota drží na této hodnotě, poté dochází k pomalému poklesu a ve 110 [s] po odlití činí 101 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Od počátku lití mírný nárůst této teplotní křivky. Svého maxima dosahuje v 110 [s] po odlití a na této teplotě 77 [°C] setrvává.

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] a nenaznačují výrazné prohřívání formy. Jejich nárůst je oproti počáteční teplotě o 20 až 40 °C.

#### **Simulační výpočet č. 5 (slitina ZnAl4Cu1, teplota formy 20 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 5 [s] a teplota přehřátí taveny je 460 [°C]. Odlitek začíná tuhnou při teplotě likvidu 386 [°C] v 10 [s] po odlití. Teplotu solidu 382 [°C] dosahuje po 80 [s] tuhnutí. Poté již dochází k chladnutí odlitku, teplota klesá a ve 120 [s] má odlitek teplotu 320 [°C].

*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka prudce stoupá, svého maxima 178 [°C] dosahuje ve 45 [s]. V okamžiku 120 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 145 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce. Ve 45 [s] po odlití dosahuje svého maxima 190 [°C], pak začíná klesat. V časovém okamžiku 120 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 138 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Tato křivka má své maximum ve 37 [s] po odlití na teplotě 138 [°C], na které chvíli setrvává a poté začíná pomalu klesat. V okamžiku 120 [s] po odlití teplota této křivky činí 110 [°C].

*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Prohřívání tohoto místa formy je maximální v 55 [s] po odlití na teplotě 120 [°C]. Ve 120 [s] po odlití činí 100 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Od počátku lití mírný nárůst této teplotní křivky. Ve 120 [s] po odlití má teplotu 80 [°C].

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

**Měření č. 6 (slitina ZnAl4Cu1, teplota formy 250 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 4 [s] a teplota přehřátí taveny je 451 [°C]. Od tohoto okamžiku teplota klesá, odnímá se teplo přehřátí. Odlitek začíná tuhnou při teplotě likvidu 398 [°C] v 12 [s] po odlití. Tuhnutí odlitku trvá 109 [s] a teplota solidu je 380 [°C]. Poté již dochází k chladnutí odlitku, teplota klesá a ve 150 [s] má odlitek teplotu 348 [°C].

*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka stoupá, v 50 [s] dosahuje svého maxima 359 [°C] a tím dochází k postupnému prohřívání formy. V okamžiku 150 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 335 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce ukazuje postupné prohřívání formy. Ve 60 [s] po odlití dosahuje svého maxima 345 [°C], na které se drží, poté začíná klesat. V časovém okamžiku 150 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 326 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Tato křivka má mírný nárůst a v 60 [s] po odlití dosahuje svého maxima na teplotě 328 [°C], na které se drží, poté začíná mírně klesat. V okamžiku 150 [s] po odlití teplota této křivky činí 317 [°C].

*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Srovnatelný průběh jako křivka č. 4. Prohřívání tohoto místa formy je maximální v 70 [s] po odlití. Po dobu asi 15 [s] se teplota drží na 321 [°C], poté dochází k pomalému poklesu a v 150 [s] po odlití činí 312 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Od počátku lití mírný nárůst této teplotní křivky. Svého maxima dosahuje v 76 [s] po odlití a na této teplotě setrvává, poté začíná mírně a pozvolna klesat a ve 150 [s] po odlití má tato vrstva formy teplotu 303 [°C].

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] a nenaznačují výrazné prohřívání formy. Jejich nárůst je oproti počáteční teplotě o 20 až 40 °C.

**Simulační výpočet č. 6 (slitina ZnAl4Cu1, teplota formy 250 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 5 [s] a teplota přehřátí taveny je 460 [°C]. Odlitek začíná tuhnou při teplotě likvidu 386 [°C] v 12 [s] po odlití. Teploty solidu 382 [°C] dosahuje po 110 [s] tuhnutí a poté již dochází k chladnutí odlitku, teplota klesá a ve 160 [s] má odlitek teplotu 350 [°C].



*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka prudce stoupá, svého maxima 359 [°C] dosahuje v 55 [s]. Ve 160 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 338 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce. V 65 [s] po odlití dosahuje svého maxima 350 [°C], kde se chvíli drží, poté začíná klesat. V časovém okamžiku 160 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 325 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Po odlití dosahuje svého maxima na teplotě 330 [°C]. V okamžiku 160 [s] po odlití je teplota 314 [°C].

*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Prohřívání tohoto místa formy je maximální v 70 [s] po odlití na teplotě 321 [°C], poté dochází k pomalému poklesu a v 160 [s] po odlití činí 307 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Svého maxima dosahuje v 80 [s] po odlití, poté začíná pozvolna klesat a ve 160 [s] po odlití má tato vrstva formy teplotu 300 [°C].

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

#### **Měření č. 7 (slitina ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>, teplota formy 20 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 4 [s] a teplota přehřátí taveny je 490 [°C]. Od tohoto okamžiku teplota klesá, odnímá se teplo přehřátí. Odlitek začíná tuhnou při teplotě likvidu 392 [°C] v 16 [s] po odlití. Tuhnutí odlitku trvá 49 [s] a teplota solidu je 383 [°C]. Poté již dochází k chladnutí odlitku, teplota klesá a ve 110 [s] má odlitek teplotu 298 [°C].

*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka stoupá, v 30 [s] dosahuje svého maxima 175 [°C] a tím dochází k postupnému prohřívání formy. V okamžiku 110 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 128 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce ukazuje postupné prohřívání formy. Ve 38 [s] po odlití dosahuje svého maxima 137 [°C], poté začíná klesat. V časovém okamžiku 110 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 108 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Tato křivka po odlití stoupá do 47 [s] na teplotu 99 [°C], na které se drží po dobu asi 10 [s] a poté začíná mírně klesat. V okamžiku 110 [s] po odlití teplota této křivky činí 84 [°C].



*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Prohřívání tohoto místa formy je po odlití pozvolné a maximální v 74 [s] na teplotě 78 [°C]. Dochází k pomalému poklesu a v 110 [s] po odlití činí 84 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Od počátku lití mírný nárůst této teplotní křivky. Svého maxima dosahuje v 70 [s] po odlití a na teplotě 76 [°C] setrvává, poté začíná mírně a pozvolna klesat.

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] a nenaznačují výrazné prohřívání formy. Jejich nárůst je oproti počáteční teplotě o 10 až 40 °C.

### **Simulační výpočet č. 7 (slitina ZnAl4Cu3, teplota formy 20 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 5 [s] a teplota přehřátí taveny je 490 [°C]. Odlitek začíná tuhnou v 16 [s] po odlití při teplotě likvidu 390 [°C] po dobu 50 [s]. Teplota solidu je 382 [°C]. Ve 120 [s] má odlitek teplotu 300 [°C].

*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka prudce stoupá, svého maxima 175 [°C] dosahuje v 30 [s]. V okamžiku 120 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 130 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce. Ve 40 [s] po odlití dosahuje svého maxima 140 [°C]. V časovém okamžiku 120 [s] po odlití je teplota formy 110 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Po odlití teplota stoupá po dobu 50 [s] na teplotu 100 [°C]. V okamžiku 120 [s] po odlití teplota této křivky činí 80 [°C].

*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Prohřívání tohoto místa formy je po odlití pozvolné a maximální v 80 [s] na teplotě 80 [°C]. Ve 120 [s] po odlití činí 76 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Svého maxima dosahuje v 65 [s] po odlití a na teplotě 80 [°C].

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.



**Měření č. 8 (slitina ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>, teplota formy 250 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 3 [s] a teplota přehřátí taveny je 491 [°C]. Od tohoto okamžiku teplota klesá, odnímá se teplo přehřátí. Odlitek začíná tuhnou při teplotě likvidu 392 [°C] v 15 [s] po odlití. Tuhnutí odlitku trvá 111 [s] a teplota solidu je 378 [°C]. Poté již dochází k chladnutí odlitku, teplota klesá a ve 150 [s] má odlitek teplotu 350 [°C].

*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka stoupá, v 66 [s] dosahuje svého maxima 362 [°C] a tím dochází k postupnému prohřívání formy. V okamžiku 150 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 334 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce ukazuje obdobný průběh jako křivka č. 2. V 60 [s] po odlití dosahuje svého maxima 344 [°C], pak začíná klesat. V časovém okamžiku 150 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 326 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Tato křivka již nemá takový nárůst jako křivky 2 a 3, nicméně po odlití stoupá do 93 [s] na teplotu 319 [°C], na které se drží po dobu asi 15 [s] a poté začíná mírně a pomalu klesat. V okamžiku 150 [s] po odlití teplota tohoto místa formy činí 309 [°C].

*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Srovnatelný průběh jako křivka č. 4. Prohřívání tohoto místa formy je maximální ve 114 [s] po odlití na teplotě 303 [°C], poté dochází k pomalému poklesu a ve 150 [s] po odlití činí 299 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Od počátku lití mírný nárůst této teplotní křivky. Svého maxima dosahuje ve 110 [s] po odlití na teplotě 293 [°C], poté začíná mírně a pozvolna klesat. Ve 150 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 291 [°C].

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] a nenaznačují výrazné prohřívání formy. Jejich nárůst je oproti počáteční teplotě nepatrně vyšší.

**Simulační výpočet č. 8 (slitina ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub>, teplota formy 250 °C):**

*Křivka č. 1* - časová závislost teploty v tepelné ose odlitku. Doba lití je cca 5 [s] a teplota přehřátí taveny je 490 [°C]. Odlitek začíná tuhnou v 15 [s] po odlití při teplotě likvidu 390 [°C] po dobu 120 [s]. Teplota solidu je 382 [°C]. Ve 160 [s] má odlitek teplotu 350 [°C].



*Křivka č. 2* - teplota formy ve vzdálenosti 3 [mm] od líce. Po odlití tato křivka prudce stoupá, svého maxima 362 [°C] dosahuje v 70 [s]. V okamžiku 160 [s] po odlití má v tomto místě forma teplotu 338 [°C].

*Křivka č. 3* - teplota formy ve vzdálenosti 10 mm od líce. V 65 [s] po odlití dosahuje svého maxima 345 [°C]. V časovém okamžiku 160 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 320 [°C].

*Křivka č. 4* - teplota formy ve vzdálenosti 15 [mm] od líce. Po odlití stoupá do 100 [s] na teplotu 320 [°C], poté začíná mírně a pomalu klesat. V okamžiku 160 [s] po odlití teplota tohoto místa formy činí 310 [°C].

*Křivka č. 5* - teplota ve vzdálenosti 22 [mm] od líce formy. Prohřívání tohoto místa formy je maximální ve 110 [s] po odlití na teplotě 300 [°C]. Ve 160 [s] po odlití činí 300 [°C].

*Křivka č. 6* - teplota ve vzdálenosti 30 [mm] od líce formy. Svého maxima dosahuje ve 110 [s] po odlití na teplotě 290 [°C], poté začíná mírně klesat. Ve 160 [s] po odlití má toto místo formy teplotu 286 [°C].

*Křivka č. 7, 8, 9, 10* - teploty znázorněné těmito křivkami odpovídají místům vzdáleným od líce formy 40 a více [mm] svým charakterem celkově odpovídají naměřeným průběhům. Vzdálenější místa od líce vykazují větší shodu.

## 9. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této disertační práci přináší dílčí informace a přispívají ke komplexnímu náhledu na vlastnosti a chování čistého zinku a slitin zinku při výrobě odlitků. I přesto, že v současné době nastává značný rozvoj výroby odlitků ze slitin zinku pro automobilový průmysl, neexistuje u nás žádná publikace, která by komplexně charakterizovala fyzikální, metalurgické, slévárenské a mechanické vlastnosti zinku a slitin zinku. Některé zahraniční publikace [1], [2], [3], [6], [8] charakterizují technologické vlastnosti těchto slitin především pro účely vysokotlakého lití. Publikace [11] a [12] se věnují problematice slitin zinku s ohledem užitečných vlastností pro automobilový průmysl.

Z našich výzkumníků se problematice slévárenských slitin zinku věnovali PTÁČEK a USTOHAL [13], kteří tyto slitiny charakterizovali především z materiálového hlediska.

Na základě poznatků a výsledků obsažených v této doktorské práci je možno se vyjádřit k těmto skutečnostem.

1. Posuzujeme-li fyzikální, tepelně-fyzikální, chemické, mechanické a užité vlastnosti zinku s dalšími používanými slévárenskými materiály (zejména hliníkem, popř. mědí, hořčíkem, cínem a další), je patrné, že z hlediska některých tepelně-fyzikálních vlastností (teplota tání  $419\text{ }^{\circ}\text{C}$ , měrná tepelná kapacita v kapalném stavu je  $502\text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , latentní krystalizační teplo činí  $112\,923\text{ J.kg}^{-1}$ ) je čistý zinek velmi dobrým slévárenským materiálem. V tomto smyslu je třeba ještě konstatovat, že pro slévárenské účely je důležitá hodnota měrné tepelné kapacity. Čím je tato hodnota vyšší, tím se látka pomaleji zahřívá a také pomaleji chladne.

Nízká teplota tání dává zinku a jeho slitinám podstatně lepší podmínky pro jeho tavení a odlévání. Zinek také nevykazuje tak značnou afinitu ke kyslíku jako hliník. Zinek a slitiny zinku mají vyšší hustotu (v porovnání s hliníkem a jeho slitinami). Hustota čistého zinku v kapalném stavu je  $6570\text{ kg.m}^{-3}$  a hustota hliníku v tomto stavu činí pouze cca  $2600\text{ kg.m}^{-3}$ . Tato vyšší hustota zinku nebrání v jeho využití pro výrobu drobnějších odlitků do hmotnosti  $0,5\text{ kg}$ , výjimečně odlitků o vyšší hmotnosti. Dynamická viskozita a povrchové napětí (povrchová aktivita), které mají vliv na tekutost tavenin, jsou u zinku příznivé. Hodnota dynamické viskozity je  $3,5\text{ [Pa.s]}$  (hliník  $2,7\text{ Pa.s}$ ) a povrchové napětí činí  $0,76\text{ [N.m}^{-1}]$  (hliník  $0,84\text{ N.m}^{-1}$ ). Tekutost

zinku, ale i ostatních tavenin, je se vzrůstající teplotou lepší. To má za následek i lepší zabíhavost, která je u zinku až 1,58 m při teplotě lití 550 °C.

Objemové změny zinku a jeho slitin při gravitačním lití do pískových a kovových forem při tuhnutí vedou ke vzniku staženin a pórovitosti odlitků. Objemu staženin při tuhnutí zinku činí cca 4,1 %. To lze stanovit na základě hodnoty hustoty zinku při tuhnutí cca ( $\rho = 6866 \text{ kg.m}^{-3}$ ) a hodnoty hustoty taveniny zinku při teplotě tuhnutí cca ( $\rho = 6570 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Objem staženiny lze vypočítat z podmínky, že objem taveniny je roven objemu ztuhlého kovu a objemu staženiny: ( $V_t = V_z + V_s$ ). Objem taveniny lze vypočítat:  $V_t = 6866/6570 \cdot V_z$ . Dále lze vyjádřit, že  $1,045 \cdot V_z = V_z + V_s$ . Objem staženiny činí 4,5 %. Velikost objemového smrštění slitin zinku se pohybuje dle literárních podkladů [26] mezi 4 a 6 %. Při odlévání do kovových forem, kdy nejsou podmínky pro průběh filtrace taveniny (penetrace taveniny mezi ztuhlými krystaly odlévaného materiálu), objemové změny staženin činí až 6 %. Též lineární smrštění odlitků ze slitin zinku je úzce spojeno s použitou technologií odlévání. Při gravitačním lití odlitků do kovové formy je velikost smrštění okolo 1,1 %; pro gravitační lití do trvalých (kovových) forem se smrštění pohybuje okolo 1,6 %; pro tlakové lití, které je nejvyužívanějším způsobem výroby odlitků, činí velikost smrštění zinku a jeho slitin 0,6 %.

Mechanické vlastnosti zinku jsou následující: pevnost v tahu je mezi 127 až 196 [MPa], tvrdost dle Brinella se pohybuje okolo 300 HB, modul pružnosti v tahu je mezi 34 500 až 120 000 [MPa] (závisí na struktuře). Pro slitiny zinku jsou hodnoty pevnosti v tahu mezi 215 až 400 [MPa], podle druhu použité slitiny a typu slévárenské formy. Tvrdost dle Brinella se pohybuje mezi 70 a 125 HB. Modul pružnosti v tahu je mezi 75 000 a 127 000 [MPa], podle druhu slitiny, nejnižší modul pružnosti vykazuje slitina ZnAl27. Celkově jsou mechanické vlastnosti slitin zinku hodnoceny jako vynikající (v porovnání s ostatními používanými materiály Al, Cu, LGG - s hliníkem jsou zinek a slitiny zinku porovnávány nejčastěji). Pouze při vysoké teplotě a teplotě pod -20 °C jsou mechanické vlastnosti nižší. Zinek a slitiny zinku se pokrývají vrstvou šedě zbarveného zásaditého uhličitanu  $4\text{Zn(OH)}_2\text{CO}_2$ , která je ve vodě téměř nerozpustná a chrání odlitek před oxidací. Proto dobře odolávají benzínu, olejům, alkoholu a slabým zásaditým roztokům. Mají dobré dynamické vlastnosti, jsou odolné proti opotřebení a dobře obrobitelné (možnost použít vysokou rychlost obrábění).

2. Pokud sledujeme metalurgické hledisko tavení a odlévání slitin zinku je možno konstatovat, že lze volit běžné metalurgické náčiní. Tavení lze provádět průmyslově v litinových kelímcích pod víkem. Pro účely poloprovozní je možno využít i kelímky grafitové. Pece lze vytápět plynem nebo elektricky, popř. koksem. Při tavení v poloprovozních podmínkách lze použít pece elektrické odporové, avšak bez přímého zásahu taveniny teplem, které způsobuje hoření povrchových vrstev taveniny (nutná tavba s ochranou povrchu taveniny). Při průmyslovém tavení je možno hladinu taveniny krýt tavidlem. Výhodou je nižší pásmo tuhnutí, kde není pórovitost a mikrostaženiny. Teplota lití se pohybuje mezi 455 až 610 °C.

Slitiny zinku je možné odlévat všemi dostupnými metodami lití s ohledem na jejich chemické složení. Při vyšším obsahu hliníku (12 až 27 %) je nutné volit odlévání pouze do studené formy. Má-li slitina obsah hliníku do 8 %, je možné využít nejen formu předeřátou, většinou na 150 až 200 °C, ale také formu studenou. Slitiny zinku jsou dále využívány i při lití odstředivém, kde se jedná zejména o malosériovou výrobu odlitků.

3. Pokud sledujeme čistý zinek z hlediska chemického, je možno konstatovat, že zinek je kov, který se řadí do podskupiny II.B, jeho atomové číslo je 30 a relativní atomová hmotnost 65,38. Na základě termodynamických výpočtu lze zjistit, že teplota tání čistého zinku je 419,5 °C (692,5K) při atmosférickém tlaku 101 325 Pa, a pro roztavení 1 kg čistého zinku je třeba 267516 [J].

4. Hodnocením výsledků tepelných výpočtů zinku a jeho slitin je zřejmé, že pro ohřátí 1 kg čistého zinku z teploty 20 na 420 °C je potřeba 266 982 [J], pro ohřátí tohoto množství slitiny ZnAl4 je třeba 265 206 [J], pro ohřátí slitiny ZnAl4Cu1 je třeba 268 340 [J], pro ohřátí ZnAl4Cu3 je potřeba 275 790 [J]. Pro ohřátí 1 kg čistého hliníku z teploty 20 na 420 °C je třeba 358 400 [J] a to ještě není při této teplotě roztavený, avšak zinek a jeho slitiny při teplotě 420 °C jsou již nataveny. Hliník má teplotu tání 660 °C a pro natavení 1 kg je třeba 988 523 [J]. Pro natavení zinku je potřeba 3,5 násobně nižší tepelná energie než pro hliník. Hliník má vysokou slučivost s kyslíkem za vzniku Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, která pokrývá taveninu hliníku a zhoršuje jeho tavitelnost. Také vysoký součinitel tepelné vodivosti hliníku ( $\lambda = 230 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) přispívá k vyšší tepelné energii pro tavení hliníku. Naopak zinek nevykazuje příliš vysokou slučivost



s kyslíkem a jeho tavitelnost je velmi dobrá. K tomu také přispívá příznivá hodnota součinitele tepelné vodivosti ( $\lambda = 110 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ), která je v porovnání s hliníkem poloviční. Celkově lze k tavitelnosti slitin zinku konstatovat, že je velmi dobrá, to souvisí s výše uvedenými příznivými vlivy, ale také s nízkou teplotou tání a s nízkou hodnotou skupenského tepla. Teploty tání slitin zinku nepřesahují teplotu  $390^\circ\text{C}$  a jak je obecně známo, teplota tání čistého zinku je  $420^\circ\text{C}$ . Také latentní krystalizační teplo čistého zinku je cca  $113 \text{ kJ.kg}^{-1}$  a slitiny zinku vykazují cca  $110 \text{ kJ.kg}^{-1}$ . Současně je třeba připomenout, že slitiny zinku před odléváním nepotřebují příliš značné metalurgické ošetření, pouze pečlivé odstranění strusky s povrchu taveniny. Nepříznivou vlastností zinku i jeho taveniny je poměrně vysoká hustota, která pro taveninu zinku je  $6570 \text{ kg.m}^{-3}$ , což přispívá k zhoršení manipulaci s taveninou při odlévání.

**5.** Z průběhu teplotních křivek tuhnutí a chladnutí odlitků, které byly získány na základě prováděných experimentů je patrné, že slitina  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$  tuhne rychleji než ostatní zde sledované taveniny (čistý zinek a slitiny  $\text{ZnAl}_4$  a  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_1$ ). To je způsobeno vyšším obsahem mědi ve slitině, která je výborným vodičem tepla. Podíváme-li se na množství tepla, které je potřeba čistému zinku a ostatním slitinám zinku dodat, je právě u této slitiny ( $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$ ) množství dodaného tepla nejvyšší. Výborná schopnost mědi vést teplo způsobuje, že teplo je rychle odváděno do okolí. Proto musíme pro fázovou přeměnu taveniny slitiny  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$  dodat více tepla než je tomu v porovnání s ostatními zde sledovanými slitinami a čistým zinkem. Zinek a slitiny zinku patří do skupiny kovů s nízkou teplotou tání, jsou to lehce tavitelné neželezné kovy.

**6.** Hodnoty zabíhavosti, které byly také získány v rámci prováděných experimentů, ukazují, že se zvyšující se teplotou lití je větší schopnost taveniny vyplnit formu. Nejvyšší hodnotu zabíhavosti vykazuje čistý zinek při teplotě lití  $550^\circ\text{C}$  a to až 1,6 m. U jednotlivých sledovaných slitin zinku je rozdíl velikosti zabíhavosti jen nepatrný, pro slitinu  $\text{ZnAl}_4$  je to hodnota 1,33 m; pro slitinu  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_1$  činí hodnota zabíhavosti 1,29 m a pro slitinu  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$  je zabíhavost až 1,27 m. Pro teplotu lití  $420^\circ\text{C}$  klesla zabíhavost pro čistý zinek na 1,103 m; pro slitinu  $\text{ZnAl}_4$  na hodnotu 0,539; u slitiny  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_1$  to je 0,420 m a pro slitinu  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$  na hodnotu 0,358 m. Zabíhavost závisí nejen na teplotě lití, ale také na povrchovém napětí taveniny a typu slévárenské formy.

Obecně velmi dobrá, až vynikající zabíhavost zinku a jeho slitin umožňuje lití tenkostěnných tvarově složitých odlitků i o hmotnosti okolo 1 gramu. Výhodou je, že je možnost odlévat některé odlitky i se závitem.

7. Hodnotíme-li získané výsledky týkající se vylévací zkoušky, resp. stanovení konstanty tuhnutí  $k$  čistého zinku a slitin zinku, lze konstatovat, že tato konstanta se pohybuje v rozmezí 0,45 (čistý zinek, forma z CT směsi) až  $2,07 \cdot 10^{-3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}]$  (slitina  $\text{ZnAl4Cu3}$ , forma kovová s počáteční teplotou  $20^\circ\text{C}$ ). Jak získané výsledky potvrzují, konstanta tuhnutí závisí na mnoha faktorech, tj. na slitině a jejích vlastnostech (teplotě tání, hustotě, tepelném toku a latentním teple), na tepelně-fyzikálních vlastnostech formy, na tvaru odlitku a intenzitě odvodu tepla z odlitku do formy. Přesné stanovení hodnoty konstanty tuhnutí výpočtem je velmi obtížné, neboť nejsou známe přesné hodnoty potřebných veličin čistého zinku, ale především jeho slitin. Nehledě, že výpočet konstanty tuhnutí  $k$ , podle obecně známého vztahu

$$k = 1,158 \frac{T_S \cdot b_F}{[L_{KR} + (T_{lití} - T_S) \cdot c_M] \cdot \rho_M}$$
 je složitý. Tato složitost souvisí s dostupností

odpovídajících tepelně fyzikálních veličin potřebných k dosazení do tohoto vztahu. Na základě dostupných hodnot pro čistý zinek - teplota lití  $500^\circ\text{C}$  ( $\rho = 6570 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $c_L = 502 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $L_{KR} = 112\,923 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) a pro tepelně fyzikální veličiny oceli 19552 ( $\lambda = 19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $c = 510 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\rho = 7700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ). Po dosazení do výše uvedeného vztahu možno vypočítat  $k = 3,7 \cdot 10^{-3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}]$ . Tato hodnota velmi dobře koresponduje s hodnotou  $k = 3,48 \cdot 10^{-3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}]$ , kterou uvádí ve své publikaci PŘIBYL [42].

Získané hodnoty konstanty tuhnutí čistého zinku a slitin zinku pomocí vylévací zkoušky, lze považovat za dobré a celkem odpovídající. V této souvislosti je třeba poznamenat, že u slitin, které tuhnou progresivně je možno dobře proměřovat tloušťku ztuhlé vrstvy. Konstanta tuhnutí však může být v průběhu tuhnutí stejná nebo proměnlivá i pro případ progresivního tuhnutí. V této souvislosti je možno konstatovat, že používané slitiny zinku mají takové chemické složení, které se přibližuje eutektickému bodu (rozdíl teplot tuhnutí je minimální,  $382$  až  $390^\circ\text{C}$ ). Použitý odlitek tvaru válce zde také tuhne velmi usměrněně.

Zvolenou metodikou vylévací zkoušky, která byla použita v této doktorské práci, lze určit nejen konstantu tuhnutí, ale i její změnu v průběhu tuhnutí s ohledem na typ formy, předehřev kovové formy a velikost přehřátí odlévané taveniny. Dosažené



výsledky potvrzují předpoklad, že hodnota konstanty tuhnutí je ovlivňována vlastnostmi slitiny a slévárenské formy. Čím je vyšší teplota tuhnutí slitiny, tím rychleji za jinak stejných podmínek tavenina tuhne. Naopak, slitiny s vyšší hodnotou latentního krystalizačního tepla vykazují delší dobu tuhnutí a tím vykazují nižší hodnotu konstanty tuhnutí při stejných podmínkách. Také vyšší teplota přehřátí přispívá k nižší hodnotě konstanty tuhnutí. Pokud sledujeme vliv formy, pak forma s vyšší tepelnou akumulací přispívá k vyšším hodnotám konstanty tuhnutí. Naopak teplejší forma snižuje hodnotu konstanty tuhnutí, protože vykazuje nižší hodnotu součinitele tepelné akumulace.

**8.** Pokud hodnotíme sledovanou odolnost čistého zinku a slitin zinku vůči trhlinám, je nutno konstatovat, že kritickým místem pro vznik trhlin je oblast odlitku, která setrvává v kapalném stavu výrazně déle než její okolí. V případě odlitku používaného při zkoušce podle BOČVARA a SVIDERSKÉHO, viz obr. 5-15, je kritickou oblastí pro vznik trhlin střední partie odlitku, viz obr. 5-20. Ta může charakterizovat vznik trhlin pomocí tří časových okamžiků:

- I. časový okamžik - teplota střední partie odlitku se nachází mezi teplotou likvidu a teplotou solidu. V této oblasti odlitku již začala skupenská přeměna a její struktura je tvořena rostoucími dendrity obklopené zahušťující se taveninou. Koncové části odlitku (díky tuhnutí na tvarované kovové podložce) jsou již ztuhlé v celém průřezu a smršťují a jejich bržděné smršťování vyvolává tahovou deformaci střední partie odlitku. Vzhledem k tomu, že podíl taveniny v mezidendritických prostorech této partie odlitku je relativně vysoký, jsou její lokální tahové deformace relativně malé a kompenzují se existující taveninou.
- II. časový okamžik - kdy teplota střední partie odlitku klesá pod teplotu solidu, tj. kritický časový okamžik pro vznik trhlin. Struktura této oblasti je charakterizovaná snížením podílu mezidendritické taveniny, která zhoustla a vytvořila tenké filmy na povrchu dendritů. Následkem jsou velmi nerovnoměrná tahová napětí ve střední partii odlitku, které se soustřeďují na tenkých filmech taveniny. Soudržnost materiálu je v této střední partii odlitku také velmi nízká a je v podstatě daná adhezí soustavy dendrit - film taveniny - dendrit. Adhezní síly mezi filmem a dendritem jsou velmi malé a v důsledku tahových napětí dochází k porušení souvislosti materiálu - vznik trhlin.



III. časový okamžik - odpovídá podmínkám, kdy mezidendritické filmy jsou ještě v souladu s oblastí taveniny a vzniklá trhlina se zaplňuje taveninou, což je příznivé. Dochází tak k zacelení materiálu a současně odolávání tahovým napětím, které je vyvozeno bržděným smršťováním odlitku. Tím je materiál bez trhlín.

Z mých výsledků týkajících se sledování sklonu čistého zinku a slitin zinku ke vzniku trhlín je zřejmé, že zinek a slitiny zinku jsou materiálem, který má příznivé chemické složení v roztaveném stavu, příznivou hodnotu součinitele teplotní roztažnosti ( $\alpha$ ), a tepelné vodivosti ( $\lambda$ ), které nabývají při teplotách odpovídající teplotám horní pružné oblasti materiálu. Dále k tomu také přispívá malý interval teplot tuhnutí používaných slitin zinku (ZnAl4, ZnAl4Cu1 a ZnAl4Cu3). Tyto skutečnosti přispívají k výše uvedenému mechanismu odolávajícímu vzniku trhlín při bržděnému smršťování odlitku.

**9.** Hodnoty lineárního smrštění, které byly prováděny na odlitku tvaru I (viz obr. 5-20) z čistého zinku a slitin zinku se pohybovaly v rozsahu 1,24 až 1,45 mm. Nejvyšší hodnota lineárního smrštění 1,45 mm byla naměřena u odlitku z čistého zinku při teplotě lití 550 °C. Nejmenší lineární smrštění 1,24 mm bylo naměřeno za stejných podmínek lití jako nejvyšší hodnota, avšak u slitiny ZnAl4Cu3. Při teplotě lití 450 °C se hodnota lineárního smrštění u všech typů tavenin pohybovala okolo 1,3 mm. Z průběhu křivek dilatace je patrné, jak docházelo ke smrštění během tuhnutí odlitku tvaru I.

V této souvislosti je třeba doplnit, že čistý zinek vykazuje součinitel teplotní roztažnosti  $\alpha = 27,2 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ , krystalizuje v soustavě hexagonální těsně uspořádané. Součinitel teplotní roztažnosti čistého hliníku činí  $\alpha = 23,8 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$  a čistý hliník krystalizuje v soustavě kubické plošně centrované. Poměr těchto hodnot je 1,12. Teplota tání čistého zinku je cca 420 °C a čistého hliníku 660 °C. Pro čistý zinek lze vypočítat  $27,2 \cdot 10^{-6} \cdot 420 = 0,011$  a pro čistý hliník  $23,8 \cdot 10^{-6} \cdot 660 = 0,016$ . Jak je obecně známo, hodnota součinu teplotní roztažnosti a teploty tání je u všech kovů přibližně stejná. Čím kov má vyšší teplotu tání, tím vykazuje nižší hodnotu teplotní roztažnosti. S touto úvahou lze také určit součinitel teplotní roztažnosti slitin zinku, který by měl být cca  $27,4 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ .

Pokud se týká sledování lineárního smršťování odlitků při jejich chladnutí, tak na délku 1000 mm se čistý zinek smrští o 16,1 mm a čistý hliník o 17,9 mm. Poměr těchto hodnot činí 1,11. Pokud bychom využili hodnoty smrštění i při ověření naměřených

hodnot smrštění odlitku při jeho tuhnutí, resp. chladnutí, pak lze vypočítat, že pro sledovaný odlitek z čistého zinku délku 158 mm by se měl volně smrštit o hodnotu 2,5 mm a tento odlitek z čistého hliníku o hodnotu 2,8 mm.

Z výše uvedených hodnot lineárního smrštění s použitím přípravku pro odlévání odlitku „tvaru I“ dochází vlivem třecího odporu postranních kovových částí do jisté míry k bržděnému smršťování a hodnoty smrštění odlitků z čistého zinku a jeho slitin činí pouze 1,24 až 1,45 mm, to je v porovnání s vypočítanou hodnotou 2,5 mm jen téměř poloviční.

**10.** Sledování metalografické struktury získaných zkušebních odlitků bylo provedeno orientačně, avšak hlavním účelem bylo zjištění vlivu různé rychlosti ochlazování na strukturu odlitku ze zinku a jeho slitin. Obecně lze konstatovat, že větší rychlost ochlazování odlitku při ostatních srovnatelných podmínkách (např. gravitační lití do kovové formy) vede k tvorbě jemnozrnnější struktury, než je ochlazování s nižší intenzitou odvodu tepla z tuhnoucí taveniny (např. forma z CT směsi). Tyto skutečnosti byly potvrzeny sledováním struktury získaných odlitků na světelném mikroskopu a pomocí programu LUCIA. U odlitků byla sledována velikost částic fáze bohaté na zinek, viz rovnovážný diagram na obr. 2-4 fáze  $\eta$ .

Z výsledků experimentů gravitačního lití do kovové formy je patrná dendritická struktura. Dendrity narůstají rychleji při gravitačním lití do studené kovové formy, než do zahřáté kovové formy na pracovní teplotu cca 200 °C před odléváním, jak je patrné z obr. 5-25, vzorek č. 4 a č. 5. Růst dendritů je ovlivněn rychlým odvodem tepla z odlitku do formy. Kovová forma má velkou akumulaci schopnost a pokud její počáteční teplota je 20 °C, je zde velký teplotní gradient a dochází k velmi rychlému odvodu tepla z tuhajícího odlitku. Při tuhnutí odlitků ve formě z CT směsi, viz obr. 5-25, vzorky č. 1 až č. 3, je zřejmá větší velikost krystalů fáze  $\eta$ . Struktura odlitků litých vysokotlakým způsobem vykazuje velmi jemné krystaly fáze  $\eta$ .

Nejmenší plochu fáze  $\eta$  má slitina ZnAl4 pro všechny typy experimentů (lití do formy z CT směsi, do kovové formy a tlakové lití). Z výsledků uvedených v tabulce 5.24 je patrné, že slitina ZnAl4 má plochu fáze  $\eta$  při gravitačním lití do formy z CT směsi o velikosti 55,87 [ $\mu\text{m}^2$ ], zatímco největší plochu fáze  $\eta$  vykazuje slitina ZnAl4Cu3 odlita také do formy z CT směsi. Zde je velikost plochy fáze  $\eta$  75,61 [ $\mu\text{m}^2$ ]. Při pohledu

na zobrazení sledovaných struktur je patrné, že při rychlejším tuhnutí odlitků je plochy fáze  $\eta$  více.

**11.** Z výsledků (viz tabulka 6.5) sledování rozměrových změn odlitků (dilatometrická analýza), která byla provedena pro různé typy forem (forma z CT směsi, kovová forma studená a kovová forma přehřátá na 200 °C) při teplotách lití 550 °C a 450 °C a do forem s různými průměry odlitku ( $\varnothing$  60 mm,  $\varnothing$  50 mm a  $\varnothing$  40 mm) do studené kovové formy při teplotě lití 550 °C lze vyvodit následující závěry:

- A) Dilatace odlitku je výrazně ovlivněna druhem použité formy, která má vliv na dobu tuhnutí odlitku a velikost jeho dilatace při tuhnutí a chladnutí. Kovová forma má vynikající akumulární schopnost. Odlitky tuhnou nejrychleji v kovové formě s počáteční teplotou 20 °C. Je to z důvodu většího teplotního gradientu na líci formy a ve formě.
- B) Teplota lití je dalším vlivem na velikost dilatace. Z výsledků je zřejmé, že s vyšší teplotou lití se velikost dilatace snižuje. Je však nutno podotknout, že teplota lití by neměla výrazně převyšovat teplotu tuhnutí taveniny. Může dojít k propalu nejen přísadových prvků, ale zejména zinku.
- C) Provedené měření dilatace odlitku tvaru válce lze hodnotit podle druhu použité formy, ale také podle velikosti dilatace při teplotách likvidu a solidu a podle teploty lití.

Hodnotíme-li velikost dilatace podle vztahu k druhu použité formy a teploty lití, je z výsledků vidět, že největší dilataci odlitku  $\varnothing$  60 x 70 mm odlévaného do kovové formy s počáteční teplotou 200 °C a teplotou lití 550 °C vykazuje slitina zinku  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$ , došlo ke smrštění odlitku s hodnotou -0,4354 [mm]. U kovové formy s počáteční teplotou 20 °C a teplotou lití 550 °C byla naměřena největší dilatace u slitiny zinku  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_1$  a to hodnota -0,4783 [mm]. Pro formu z CT směsi a teplotu lití 550 °C byla největší dilatace -0,3816 [mm] naměřena opět u slitiny zinku  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$ . Pro teplotu lití 450 °C a kovovou formu s počáteční teplotou 200 °C byla největší dilatace -0,4766 [mm] naměřena u slitiny zinku  $\text{ZnAl}_4$ . U kovové formy s počáteční teplotou 20 °C a teplotou lití 450 °C byla největší dilatace naměřena opět u slitiny zinku  $\text{ZnAl}_4$  a to hodnota -0,4026 [mm]. Pro formu z CT směsi

a teplotu lití 450 °C byla nejvyšší hodnota dilatace zjištěna u slitiny zinku ZnAl4Cu3 a hodnota dilatace je -0,4142 [mm].

Z pohledu hodnocení celkové doby tuhnutí odlitku tvaru válce je jasné, že nejrychleji tuhnou odlitky v kovové formě s počáteční teplotou 20 °C a to proto, že v tomto případě je značný rozdíl teplot taveniny a dutiny formy a velmi rychle dochází k přestupu tepla. Je zde velmi strmý teplotní gradient. Největší nárůst dilatace při  $T_{likv}$  a to 0,0795 [mm] vykazuje slitina ZnAl4Cu1 při tuhnutí ve formě z CT směsi a teplotě lití 550 °C. V některých případech měření došlo po odlití nejprve k mírnému roztažení charakteristického rozměru odlitku, u některých měření docházelo okamžitě po odlití ke smrštění. To může být zapříčiněno aktuálním stavem okolních podmínek měření. Při měření bylo dbáno na to, aby podmínky měření byly shodné, avšak některé přírodní zákonitosti nelze ovlivnit a ty mohou pak být příčinou tohoto jevu, kdy okamžitě po odlití dochází ke smrštění odlitku. Velikost dilatace při  $T_{sol}$  měla největší nárůst při chladnutí odlitku ze slitiny ZnAl4Cu1 a to 0,14 [mm] při lití do formy z CT směsi a teplotě 550 °C. Největší dilataci (tj. již smrštění odlitku) -0,0858 [mm] vykazuje slitina ZnAl4 odlitá do kovové formy předeřáté na teplotu 200 °C a při teplotě lití 550 °C.

- D) Vliv průměru odlitku na velikost dilatace je závislý na rozměrech použité formy. Při tomto měření byla použita forma s vnějším rozměrem  $\varnothing 100 \times 100$  mm a měnícím se vnitřním průměrem. Z toho je zřejmé, že tloušťka stěny formy se měnila, to má vliv na celkové tuhnutí odlitku. Zde bylo zjištěno, že největší dilataci pro odlitek  $\varnothing 40$  mm vykazuje slitina ZnAl4 a to hodnotu -0,401 [mm], což vykazuje smrštění odlitku o 1 %. Pro odlitek o  $\varnothing 50$  mm byla největší dilatace naměřena u čistého zinku a hodnota dilatace je -0,3946 [mm], zde došlo ke smrštění odlitku o 0,65 %. Pro odlitek o  $\varnothing 60$  mm byla největší dilatace naměřena u slitiny ZnAl4Cu3 o hodnotě -0,5151 [mm], což vykazuje smrštění odlitku o 0,51 %.
- E) Pokud sledujeme hodnoty maximálního dilatačního smrštění, je nutné ke zjištěné hodnotě smrštění odlitků uvádět průměr odlitku, odlévanou slitinu, teplotu lití a typ slévárenské formy. Avšak u získaných výsledků nebyla potvrzena výrazná souvislost mezi průměrem odlitku, typem slitiny zinku, teplotou lití a výchozí teplotou formy. Pro jednotlivé odlévané materiály byly

zjištěny tyto hodnoty maximálního lineárního smrštění. U čistého zinku 0,44 mm při odlévání odlitku  $\varnothing$  60x70 mm z teploty 450 °C do předeřáté formy na 200 °C. U slitiny ZnAl4 největší hodnota smrštění je -0,48 mm při odlévání odlitku  $\varnothing$  60x70 mm z teploty 550 °C do formy o teplotě 200 °C. U slitiny ZnAl4Cu1 činí smrštění -0,476 mm, které bylo zjištěno při odlévání odlitku  $\varnothing$  60x70 mm z teploty 550 °C do studené formy o teplotě 20 °C. U slitiny ZnAl4Cu3 činí smrštění -0,412 mm, které bylo zjištěno při odlévání odlitku  $\varnothing$  60x70 mm z teploty 550 °C do formy z CT směsi.

- F) Vypočtené hodnoty součinitele lineárního smrštění  $\alpha$  byly porovnány s tabelovanými hodnotami a z výsledků je patrné, že v určitých případech bylo dosaženo stejných hodnot. Tabelované hodnotě pro čistý zinek podle [49] se nejvíce blíží hodnota  $25,5 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$  získaná při experimentálním měření do kovové formy o teplotě 20 °C a průměru odlitku 40 mm. Tabelované hodnotě pro slitinu zinku ZnAl4 se rovná hodnota získaná při experimentálním měření do kovové formy o teplotě 20 °C a průměru odlitku 50 mm. Tabelované hodnotě pro slitinu zinku ZnAl4Cu1 se nejvíce blíží hodnota  $27,5 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$  získaná při experimentálním měření do kovové formy o teplotě 20 °C a průměru odlitku 60 mm. Tabelované hodnotě pro slitinu zinku ZnAl4Cu3 se nejvíce blíží hodnota  $27,1 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$  získaná při experimentálním měření do kovové formy o teplotě 20 °C a průměru odlitku 50 mm.

**12.** Na základě sledování tepelných procesů mezi odlitkem tvaru desky 200 x 160 x 20 mm a kovovou formou 220 x 220 x 220 mm, které byly provedeny za účelem získání časových závislostí teplot, jak v tepelné ose tuhnutí odlitku, tak v různých místech slévárenské formy lze ze získaných časových závislostí sledovat průběh a velikost prohřátí jednotlivých vrstev kovové formy, do které byly taveniny zinku a jeho slitin odlévány. Největší prohřátí formy bylo zjištěno při lití čistého zinku do kovové formy s počáteční teplotou 20 °C.

Zde je možné sledovat, že u čistého zinku dochází k většímu prohřátí prvních vrstev formy a to až na teplotu 210 °C. Je to z toho důvodu, že teplota tání čistého zinku je vyšší než teploty likvidu a solidu jednotlivých slitin zinku. Časové závislosti

teplotních křivek u jednotlivých slitin zinku vykazují jen nepatrné rozdíly. Teploty likvidu a solidu jednotlivých slitin zinku mají jen minimální rozdíl (asi 1 až 2 °C).

Průběh teplotních křivek při liti do kovové formy o teplotě 20 °C vykazuje strmější nárůst než je tomu u kovové formy o teplotě 250 °C. Konečné prohřátí určitých míst kovové formy při teplotě 20 °C vykazuje rozdíl až 100 °C, zatím co u kovové formy při teplotě 250 °C se jedná jen o rozdíl asi 50 °C. Teplo, které se sdílí v určitém časovém okamžiku z odlitku do kovové formy má v případě předeřáté kovové formy menší intenzitu, než je tomu v případě kovové formy bez předeřevu. Kovová forma bez předeřevu rozvede v krátkém časovém okamžiku více tepla, čímž nedochází k tak značnému tepelnému namáhání materiálu formy. S vyšší počáteční teplotou formy souvisí i prodlužující se doba tuhnutí taveniny odlitku ve formě (viz tabulka 7.9).

**13.** Pokud hodnotíme simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků tvaru desky z čistého zinku a jeho slitin, resp. časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku v jednotlivých místech formy (vzdálenosti od líce 3, 15, 15, 22, 30, 40, 55, 70 a 85 mm) je možno konstatovat, že shoda výsledků měření a simulačních výpočtů je závislá nejen na rozpracování fyzikálně-matematického popisu sdílení tepla mezi odlitkem a formou (včetně Newtonova zákona a Fourierovy diferenciální rovnice sdílení tepla vedením), ale na věrohodnosti tepelně-fyzikálních veličin čistého zinku a jeho slitin. Tyto hodnoty byly pro slitiny zinku, označované ZAMAK získány ve spolupráci s oddělením simulačních výpočtů ŠKODA Auto a.s. Mladá Boleslav.

Pro simulační výpočty byl použit profesně sestavený program WinCast/SIMTEC (RWP Aachen). Při analýze simulačních výpočtů bylo zjištěno, že největší význam na přesnost simulačních výpočtů má součinitel přestupu, resp. prostupu tepla  $\beta$ . Dále velký význam má součinitel tepelné vodivosti formy, součinitel měrné tepelné kapacity materiálu formy. Současně velký význam mají charakteristiky odlévaného materiálu – součinitel tepelné vodivosti, latentní krystalizační teplo, měrná tepelná kapacita i teplota krystalizace.

V této souvislosti je nutno zhodnotit i význam součinitele prostupu tepla  $\beta$  v závislosti na teplotě. Tento součinitel byl zjištěn pro jednotlivé typy zinku a jeho slitin při odlévání do kovové formy, Jeho hodnoty v závislosti na teplotě jsou uvedeny v tabulce 8.1 K tomu je třeba dodat, že při nalití taveniny do formy, kdy dochází k těsnému styku, jsou hodnoty součinitele poměrně vysoké a jejich hodnota závisí nejen

na podmínkách (předehřátí kovové formy), ale také na typu odlévaného materiálu. Současně ze získaných závislostí je patrný skok hodnoty součinitele prostupu tepla, který vždy odpovídá určité teplotě (nebo teplotnímu intervalu), která udává teplotu tání (nebo teplotu krystalizace). To znamená, že při tuhnutí odlitku, kdy se vytváří vzduchová vrstva mezi odlitkem a kovovou formou, přestává být těsný styk. Součinitel prostupu tepla se výrazně snižuje. Také rostoucí teplota předehřevu kovové formy snižuje hodnoty součinitele prostupu tepla v celé teplotní závislosti (20 až 600 °C). Při odlévání čistého zinku do studené kovové formy je maximální hodnota součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotě 6000 [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>], při předehřevu kovové formy na teplotu 250 °C tato hodnota činí jen 4800 [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>]. Podobné hodnoty vykazují jednotlivé slitiny zinku. Tak např. ZnAl4 po nalití do studené kovové formy vykazuje součinitel prostupu tepla 5550 [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>], a nalití do formy předehřáté na teplotu 250 °C součinitel prostupu tepla vykazuje hodnotu 3800 [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>]. Slitina ZnAl4Cu1 po nalití do studené formy vykazuje součinitel prostupu tepla 5520 [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] a do formy předehřáté na teplotu 250 °C 3400 [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>], podobné hodnoty součinitele prostupu tepla vykazuje i slitina ZnAl4Cu3, při odlévání do studené kovové formy 5500 [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] a 3800 [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>] do formy předehřáté na teplotu 250 °C.

V této souvislosti je třeba konstatovat, že tepelně-fyzikální veličiny zinku a jeho slitin (ZnAl4, ZnAl4Cu1 a ZnAl4Cu3) uvedené v této doktorské práci jsou věrohodné a lze je doporučit k případným dalším simulačním výpočtům tuhnutí a chladnutí těchto odlitků. Hodnoty součinitelů prostupu tepla v závislosti na teplotě jsou uvedeny v tabulce 8.1.

Další potřebné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin v závislosti na teplotě nutné k simulačním výpočtům tepelných dějů soustavy, odlitek ze zinku a jeho slitin - kovová forma z oceli 19 552, byly použity z databanky programu WinCast/Simtec.

## 10. ZÁVĚR

Tato doktorská práce zpracovaná na téma: „*Sledování slévárenských vlastností slitin zinku pro výrobu odlitků*“ přispívá ke komplexnímu pohledu na slitiny zinku pro výrobu odlitků, především pro české slévárství. K tomu přispívá stále se rozvíjející automobilový průmysl, který značně využívá slitiny zinku při výrobě drobných odlitků členitého tvaru s velkou přesností rozměrů a kvalitou povrchu do hmotnosti 1 kg.

Práce je rozdělena do deseti kapitol, jenž jsou součástí dvou hlavních částí - rešeršní a experimentální. Všechny kapitoly této doktorské práce přispívají k ucelené charakteristice zinku a jeho slitin, která v podmínkách českého slévárství nikdy nebyla provedena a získané poznatky je možno použít ve slévárenské praxi.

**Rešeršní část práce** je zaměřena na charakteristiku čistého zinku a slitin zinku z hlediska jejich používání ve slévárství, včetně nejpoužívanějších způsobů výroby odlitků z těchto slitin. Současně byly popsány některé slévárenské, fyzikální a tepelně-fyzikální vlastnosti tavenin (zejména čistého zinku), které jsou dostupné v odborné literatuře a potřebné pro celkové sledování vlastností čistého zinku a slitin zinku.

**Experimentální část práce** je zaměřena na sledování vybraných slévárenských vlastností posuzovaných tavenin vybraných nejpoužívanějších slitin zinku. Nejprve byl koncipován a následně proveden výpočet některých termodynamických veličin potřebných pro tavení a krystalizaci čistého zinku. Základem byl výpočet změny Gibbsovy energie, která je měřítkem průběhu dějů probíhajících za konstantního tlaku a teploty. Tato energie byla sledována při tavení čistého zinku v závislosti na tlaku při konstantní teplotě a v závislosti na teplotě při konstantním tlaku, dále také v závislosti na teplotě a tlaku. Další výpočet byl zaměřen na změny molární entropie a entalpie při tavení čistého zinku. Také výpočty tepelné energie vyvinuté při tuhnutí odlitků z čistého zinku a slitin zinku nebo výpočty tepelné energie potřebné na roztavení určitého množství těchto slitin jsou velmi cenné pro energetickou rozvahu konkrétních výroby odlitků ze slitin zinku. Současně je třeba poznamenat, že pro tyto výpočty byly zjištěny potřebné hodnoty fyzikálně-tepelných veličin jednotlivých slitin zinku.

Řešením této doktorské práce, nejen slévárenských, ale v podstatě i tepelných vlastností zinku a jeho slitin mohlo být provedeno jen s využitím speciálních měřicích zařízení a jedno zařízení, pro sledování smrštění a brzděného smrštění odlitků, bylo k tomuto účelu sestaveno a použito na základě důkladného odzkoušení.



Pro použití všech těchto zařízení bylo nutné navrhnout a odzkoušet metodiku pro sledování slévárenských a tepelných vlastností čistého zinku a jeho slitin.

Výpočty tepelné energie potřebné k ohřátí 1 až 10 kg, které v podstatě charakterizují tavitelnost zinku a jeho slitin je možno provést jedině na základě stanovených tepelně-fyzikálních veličin.

U experimentů provedených za účelem sledování slévárenských vlastností - zabíhavost, průběh a doba tuhnutí odlitků, náchylnosti na vznik trhlin, lineárního smršťování a bržděného smrštění odlitků je potřebné měřicí zařízení. Též je nutné měřicí zařízení i pro sledování dilatačních změn odlitků při jejich tuhnutí a chladnutí. K tomuto účelu byly záměrně voleny odlitky jednoduchého tvaru válce  $\varnothing 60 \times 70$  mm, který byl odléván do kovové formy bez předehřevu, do formy předehřáté a do formy z CT směsi. U tohoto typu experimentu byl nejprve proveden teoretický výpočet dilatace odlitku, který ukázal odlišnosti mezi teoretickým výpočtem a experimentálně naměřenými hodnotami.

Rovněž experimentální sledování tepelných procesů při tuhnutí a chladnutí odlitků z čistého zinku a slitin zinku a následný simulační výpočet přispívá k hodnocení zinku a jeho slitin pro výrobu odlitků. Na základě mé zkušenosti je nutno konstatovat, že zjištěné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin zinku a jeho slitin jsou velmi důležité pro možnosti odpovídajících simulačních výpočtů tuhnutí a chladnutí průmyslově vyráběných odlitků.

Na základě poznatků a výsledků získaných v rámci této disertační práce lze formulovat následné dílčí závěry:

**1.** Zinek, resp. jeho slitiny, především na bázi  $\text{ZnAl}_4$ ,  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_1$  a  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$ , představují velmi perspektivní slévárenský materiál s nízkou teplotou tání (slitiny zinku nepřestoupí  $390^\circ\text{C}$ ) výhodnými tepelně-fyzikálními, slévárenskými, mechanickými a užitnými vlastnostmi. K výhodným tepelně-fyzikálním vlastnostem přispívají pro čistý zinek a jeho slitiny hodnoty těchto veličin:

Čistý zinek:  $c_L = 502 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}]$ ,  $c_S = 385 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}]$ ,  $L_{KR} = 112\,923 \text{ [J.kg}^{-1}]$ ,  $T_{\text{tání}} = 419,5^\circ\text{C}$ . Slitina  $\text{ZnAl}_4$ :  $c_L = 436 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}]$ ,  $c_S = 389 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}]$ ,  $L_{KR} = 110\,000 \text{ [J.kg}^{-1}]$ ,  $T_L = 387^\circ\text{C}$ ,  $T_S = 382^\circ\text{C}$ . Slitina  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_1$ :  $c_L = 450 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}]$ ,  $c_S = 395 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}]$ ,  $L_{KR} = 110\,050 \text{ [J.kg}^{-1}]$ ,  $T_L = 386^\circ\text{C}$ ,  $T_S = 382^\circ\text{C}$ . Slitina  $\text{ZnAlCu}_3$   $c_L = 455 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}]$ ,  $c_S = 420 \text{ [J.kg}^{-1}\text{.K}^{-1}]$ ,



$L_{KR} = 110\,100 \text{ [J.kg}^{-1}\text{]}$ ,  $T_L = 390 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_S = 382 \text{ }^\circ\text{C}$ . Povrchové napětí těchto slitin je cca  $0,76 \text{ [N.m}^{-1}\text{]}$ . Změna specifického objemu při tavení zinku a jeho slitin činí cca  $4,1 \%$ . Vyšší hustota zinku a jeho slitin přispívá k zabíhavosti. Hustota čistého zinku v kapalném stavu je  $6570 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ , hustota slitiny  $\text{ZnAl}_4$  v kapalném stavu je  $6660 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ , hustota slitiny  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_1$  v kapalném stavu je  $6750 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$  a hustota slitiny  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$  v kapalném stavu je  $6760 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ . Pro roztavení  $1 \text{ kg}$  čistého zinku je třeba  $267\,516 \text{ [J]}$ , tato hodnota byla stanovena na základě molární entalpie, na základě tepelného výpočtu s použitím tepelně-fyzikálních veličin tato hodnota činí  $266\,923 \text{ [J]}$ .

**2.** Zabíhavost zinku a jeho slitin souvisí s teplotou přehřátí odlévaného materiálu a s materiálem použité formy. Při použití syrové bentonitové formy s dutinou pro Curryho spirálu bylo zjištěno, že s rostoucí teplotou přehřátí odlévané taveniny se též zvyšuje i zabíhavost. Nejvyšší průměrné hodnoty zabíhavosti vykazoval čistý zinek. Při teplotě lité  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  zabíhavost čistého zinku je  $1,425 \text{ [m]}$  a při teplotě lité  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  byla  $1,58 \text{ [m]}$ . U slitiny  $\text{ZnAl}_4$  zabíhavost činí  $0,742 \text{ [m]}$ , u slitiny  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_1$  je  $0,672 \text{ [m]}$  a u slitiny  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$  je zabíhavost již jen  $0,633 \text{ [m]}$ . S vzrůstající teplotou lité zabíhavosti všech sledovaných slitin zinku rostou. Při teplotě lité slitina  $\text{ZnAl}_4$  vykazuje již  $1,327 \text{ [m]}$ , slitina  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_1$   $1,29 \text{ [m]}$  a slitina  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$   $1,272 \text{ [m]}$ .

**3.** Získané hodnoty konstanty tuhnutí pro odlitek tvaru desky z čistého zinku a jeho slitin potvrzují obecně známou skutečnost, že závisí nejen na použité slitině, ale také na materiálu slévárenské formy. Odlévání taveniny do formy s vyšší akumulací schopností vede k vyšší hodnotě konstanty tuhnutí. Při odlévání čistého zinku do nepředehřáté kovové formy konstanta tuhnutí  $k$  činí  $2,07 \cdot 10^{-3} \text{ [m.s}^{-1/2}\text{]}$ , do formy předehřáté je konstanta tuhnutí  $1,42 \cdot 10^{-3} \text{ [m.s}^{-1/2}\text{]}$  a při odlévání do formy z CT směsi jen  $0,45 \cdot 10^{-3} \text{ [m.s}^{-1/2}\text{]}$ . U slitin zinku odlévaných do výše uváděných tří typů forem se konstanty tuhnutí mírně zvyšují se zvyšujícím se obsahem mědi ve slitině. Konstanta tuhnutí pro slitinu  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$  odlévané do nepředehřáté kovové formy je  $2,61 \cdot 10^{-3} \text{ [m.s}^{-1/2}\text{]}$ , do formy kovové předehřáté na teplotu  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  konstanta tuhnutí je nižší, činí  $2,01 \cdot 10^{-3} \text{ [m.s}^{-1/2}\text{]}$  a do formy s nejnižší tepelnou akumulací, tj. do formy z CT směsi, konstanta tuhnutí je  $0,91 \cdot 10^{-3} \text{ [m.s}^{-1/2}\text{]}$ .

**4.** Sledováním náchylnosti zinku a jeho slitin ( $\text{ZnAl}_4$ ,  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_1$ ,  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$ ) na vznik trhlin bylo zjištěno, že konstrukce zkušebního odlitku podle Bočvara a Sviderského tvaru I, resp. „piškoty“, který má průřez zkušebního dřívku  $S = 275 \text{ mm}^2$  nevede

při použití tahové síly 100, 200, 300 a 400 [N] k porušení zkušebního odlitku. Teprve úprava, resp. ztenčení dřívku odlitku tvaru I na plochu průřezu 44,1 [mm<sup>2</sup>] způsobilo při odlévání čistého zinku v důsledku vyvozeného bržděné napětí 9 [MPa] při smršťování odlitku je porušení.

**5.** Sledováním hodnot maximálního bržděného lineárního smršťení (tahové napětí 1,45 MPa) u odlitků tvaru I ze zinku a jeho slitin bylo zjištěno, že zjištěné hodnoty smršťení se příliš neliší, při teplotě lití 550 °C se pohybují kolem 1 mm, celková délka zkušebního tělíska je 158 mm. Hodnoty volného smršťení při teplotě lití 550 °C vykazují sestupnou tendenci. Pro čistý zinek tato hodnota volného lineárního smršťení činí (-1,45 mm), pro slitinu ZnAl4 (-1,36 mm), pro slitinu ZnAl4Cu1 (-1,25 mm) a pro slitinu ZnAl4Cu3 hodnota volného lineárního smršťení je (-1,24 mm). Výpočtem na základě součinitele teplotní roztažnosti (v tomto případě teplotní smršťivosti) bylo stanoveno smršťení zkušebního odlitku tvaru I z čistého zinku (-0,001 mm), pro slitiny ZnAl4, ZnAl4Cu1 a ZnAl4Cu3 bylo vypočítáno smršťení (-0,0008 mm).

Hodnoty lineárního smršťení zinku a jeho slitin vypočítané z průběhu smršťení sledovaných odlitků tvaru I jsou pro teplotní interval 400 až 350 °C následující:  $20,0 \cdot 10^{-6}$  [K<sup>-1</sup>] pro čistý zinek;  $19,8 \cdot 10^{-6}$  [K<sup>-1</sup>] pro slitinu ZnAl4;  $19,7 \cdot 10^{-6}$  [K<sup>-1</sup>] pro slitinu ZnAl4Cu1 a  $19,8 \cdot 10^{-6}$  [K<sup>-1</sup>] pro slitinu ZnAl4Cu3.

**6.** Dilatometrická měření odlitků tvaru válce Ø 40x70 mm, Ø 50x70 mm, Ø 60x70 mm odlévaných ze zinku a jeho slitin, s využitím speciálního měřicího zařízení, umožňují stanovení časových průběhů dilatačních změn při tuhnutí a chladnutí odlitků. Orientační výpočet výsledného lineární smršťení odlitků Ø 40x70 mm, Ø 50x70 mm a Ø 60x70 mm na základě procentuálního vyjádření smršťení odlitku je pro odlitek Ø 40x70 mm: čistý zinek -0,644 mm; slitina ZnAl4 -0,464 mm; slitina ZnAl4Cu1 -0,468 mm; slitina ZnAl4Cu3 -0,50 mm. Pro odlitek Ø 50x70 mm: čistý zinek -0,804 mm; slitina ZnAl4 -0,58 mm; slitina ZnAl4Cu1 -0,586 mm; slitina ZnAl4Cu3 -0,625 mm. Pro odlitek Ø 60x70 mm: čistý zinek -0,97 mm; slitina ZnAl4 -0,697 mm; slitina ZnAl4Cu1 -0,702 mm; slitina ZnAl4Cu3 -0,75 mm. O něco nižší hodnoty lineárního smršťení odlitků z těchto slitin byly získány na základě výpočtu s teplotní roztažností, resp. teplotní smršťivostí.

Na základě dilatometrických měření bylo zjištěno, že lineární smršťení odlitků z čistého zinku a jeho slitin Ø 40x70 mm, Ø 50x70 mm a Ø 60x70 mm se příliš neliší

tato hodnota nepřesahuje -0,52 mm. Z výsledků hodnot dilatací nebyla prokázána jednoznačná souvislost mezi typem slitiny, typem použité formy a teplotou odlévání.

Hodnoty součinitele lineárního teplotního smrštění vypočítané na základě výsledků těchto experimentů jsou pro odlévání čistého hliníku  $25,5 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ , pro slitinu ZnAl4  $27,4 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ , pro slitinu ZnAlCu1  $27,5 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$  a pro slitinu ZnAl4Cu3  $27,1 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ . Tyto hodnoty se blíží hodnotám tabelovaným.

**7.** Tepelné děje sledované mezi odlitkem tvaru desky 220 x 160 x 20 mm a ocelovou formou 220 x 220 x 220 mm (materiál ČSN 19552) při odlévání zinku a jeho slitin potvrzují, že při odlévání se mezi tuhoucím odlitkem a formou vytváří plynová vrstva, která ovlivňuje intenzitu odvodu tepla z odlitku do formy. Při teplotě formy 200 °C velikost této vrstvy činí cca 0,4 mm. Čistý zinek, dle teoretických předpokladů vykazuje kratší dobu tuhnutí, než slitiny. U slitin zinku dobu tuhnutí odlitku ovlivňují jednotlivé prvky obsažené ve slitině a jejich tepelné vlastnosti. Také vytvoření teplotního pole v kovové formě je závislé na tepelně-fyzikálních, především součiniteli tepelné vodivosti a teplotní vodivosti a na měrné tepelné kapacitě materiálu formy. Pro řešení tepelných dějů je nutná znalost jejich teplotní závislosti. Dále jsou nutné ostatní tepelně-fyzikální veličiny.

**8.** Simulační výpočty tepelných dějů mezi odlitkem a formou, respektive časové závislosti teplot v tepelné ose sledovaných odlitků a v určitých místech ocelové formy ukazují, že k těmto účelům je nutné používat slévárenské simulační výpočtové programy, které mají velmi dobře rozpracovanou fyzikálně-matematickou podstatu výpočtu a lze u nich uplatnit jiné hodnoty fyzikálních veličin, než obsahuje databanka programu. K účelům simulačních výpočtů plně vyhovuje např. simulační program WinCast/Simtec. Dále jsou nutné hodnoty potřebných tepelně-fyzikálních vlastností slitin zinku a materiálu kovové formy, včetně teplotní závislosti hodnot součinitele prostupu tepla.

### ***Vlastní přínos práce***

Práce komplexně shrnuje a rozšiřuje poznatky získané o čistém zinku a o nejpoužívanějších slitinách zinku (ZnAl4, ZnAl4Cu1 a ZnAl4Cu3) zejména z hlediska slévárenských a tepelných vlastností.



Hlavní přínos disertační práce lze spatřovat v uceleném souhrnu a porovnání jednotlivých sledovaných slévárenských vlastností a některých tepelných vlastností čistého zinku a jeho slitin. Podstatnou součástí této práce jsou výpočty termodynamických procesů, dávají nutné informace pro ovlivňování tuhnutí a krystalizaci odlitků. Dále výpočty konstanty tuhnutí, stanovení součinitele objemového smrštění. Ke zkvalitnění disertační práce řešené v oboru strojírenská technologie přispívají také teoretické výpočet dilatace a výpočty součinitelů teplotní smrštivosti tuhnoucích odlitků z zinku a jeho slitin. Uvedené výpočty byly doplněny o experimentální měření, při kterých byla uplatněna tři měřicí zařízení a při jejich aplikaci byla vypracována a odzkoušena metodika prováděných experimentů provedených na odlitcích různých tvarů, průměrů a velikostí a také odlévaných do různých typů forem, včetně jejich vyhodnocení. Za přínos lze považovat také sestavení měřicího zařízení pro sledování bržděného smrštění odlitků.

Měření tepelných dějů a získání časových závislostí teploty v tepelné ose odlitku a v různých místech slévárenské formy s následným simulačním výpočtem umožnilo ověření potřebných tepelně-fyzikálních veličin slitin zinku a jeho slitin. Předložené výsledky naměřených experimentů a k nim provedených simulačních výpočtů vykazují určitou shodu a tím potvrzují i odborný význam všech provedených experimentů.

Poznatky a závěry této disertační práce mohou být uplatněny při řešení technologických problémů odlévání slitin zinku v českých slévárnách při výrobě různě tvarově složitých odlitků.



## 11. SEZNAM LITERATURY

- [1] COPE, M. A.: Key player in the development research and technology transfer of the work in pressure die-casting. 1. edition. Australian Zinc Development Association, 1970.
- [2] COPE, M. A.: Zinc pressure die-casting - the metal flow system. 1. edition. Australian Zinc Development Association, 1979.
- [3] KOLEKTIV AUTORŮ: Stress calculations for zinc die casting. Australian Die Casting Association, 1988.
- [4] KOLEKTIV AUTORŮ: Engineering properties of zinc alloys. Australian Die Casting Association, 1989.
- [5] TAKACH, B. V.: Die casting knowledge. Australian Die Casting Association, 1990.
- [6] COWIE, C. O.: Zinc alloys casting - product design and development. Australian Die Casting Association, 1992.
- [7] HERMAN, E. A.: Die Casting Dies. Australian Die Casting Association, 1999.
- [8] HERMAN, E. A.: Dimensional repeatability of the Die Casting Process. Australian Die Casting Association, 2000.
- [9] MATHEWSON, C. H.: Zinc. The science and technology of the metal. Its alloys and compounds. 1. edition. USA New York, 1959.
- [10] NORRIS, J.D.: History of the American Company. 1. edition. Wisconsin Madison, 1969.
- [11] COCKS, E. J., WALERS, B.: A History of the Zinc Smelting Industry in Britain. 1. edition. London: Harrap, 1968. ISBN 0245593772.
- [12] MORGAN, S. W. K.: Zinc and its alloys and compounds. 1. edition. Great Britain: England, 1985. ISBN 0-85312-762-X.
- [13] PTÁČEK, L., USTOHAL, V.: Slitiny zinku pro odlitky. Slévárenství č. 4, 2001. s. 203 - 207, ISSN 0037-6825.
- [14] HRABÁNEK, R.: Uplatnění tlakových odlitků ze slitin zinku v konkurenci se slitinami hliníku a hořčíku. Slévárenství č. 4, 2001, s. 223-225, ISSN 0037-6825.
- [15] OTÁHAL, V.: Výroba odlitků z neželezných slitin a jejich uplatnění v jednotlivých oborech. Slévárenství č. 2-3, 2001, s.147-156, ISSN 0037-6825.



- [16] DZUGAS, P., VILČKO, J.: Zlívárenské vlastnosti silumínov s vyšším obsahom zinku. Slévárenství č. 3, 1993. s. 121-128, ISSN 0037-6825.
- [17] FABIAN, V., BOLIBRUCHOVÁ, D.: Výroba Zn-odliatkov odstředivým litím do silikonovej gumy. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. 2. ročník, 2006. s. 35-42.
- [18] BARNHURST, R.J.: Gravity casting of zinc-aluminum (ZA) alloys - from theory to practice. Proceeding of the F. Weinberg International Symposium on Solidification Processing. Hamilton, Ontario, August 27-29, 1990.
- [19] SAVASKAN, T., TURHAL, M. S., MURPHY, S.: Effect of cooling rate on structure and mechanical properties of Monotectoid zinc-aluminium alloys. Materials Science and Technology; Jan 2003; 19, 1; ProQuest Science Journals, p. 67.
- [20] DURMAN, M., MURPHY, S.: An electronmetallographic study of pressure die-cast commercial zinc-aluminium-based alloy ZA27. Journal of Materials Science 32 (1997), p. 1603-1611.
- [21] KOVACHEVA, R., DOBREV, R., ZADGORSKI, S., LILOVA, A.: Phase Transformations in Zn-Al-Cu Alloys. Materials Characterization 31: 217-224 (1993).
- [22] LI, B. J., CHAO, C. G.: Phase Transformation of Zn-4Al-3Cu Alloy during Heat Treatment. Metallurgical and materials transactions A, Vol. 30A, April 1999. p. 917-923.
- [23] ZHU, Y. H., LEE, W. B., TO, S.: Ageing characteristics of cast Zn-Al based alloy (ZnAl7Cu3). Journal of Materials Science 38 (2003). p. 1945 - 1952.
- [24] YANG, L.Y.: The effect of casting temperature on the properties of squeeze cast aluminium and zinc alloys. Journal of Materials Processing technology 140 (2003), p. 391-396.
- [25] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P.: Nauka o materiálu I: nauka o kovech. 3. svazek neželezné kovy. 2. rozšířené a zcela přepracované vydání. Praha: Academia, 1973.
- [26] MÁLEK, V.: Vlastnosti prvků periodické soustavy. [Skripta], HF VŠB Ostrava 1985.
- [27] GRÍGEROVÁ, T., KOŘENÝ, R., LUKÁČ, I.: Zlívárenstvo neželezných kovov. 1. vyd., Praha 1988.

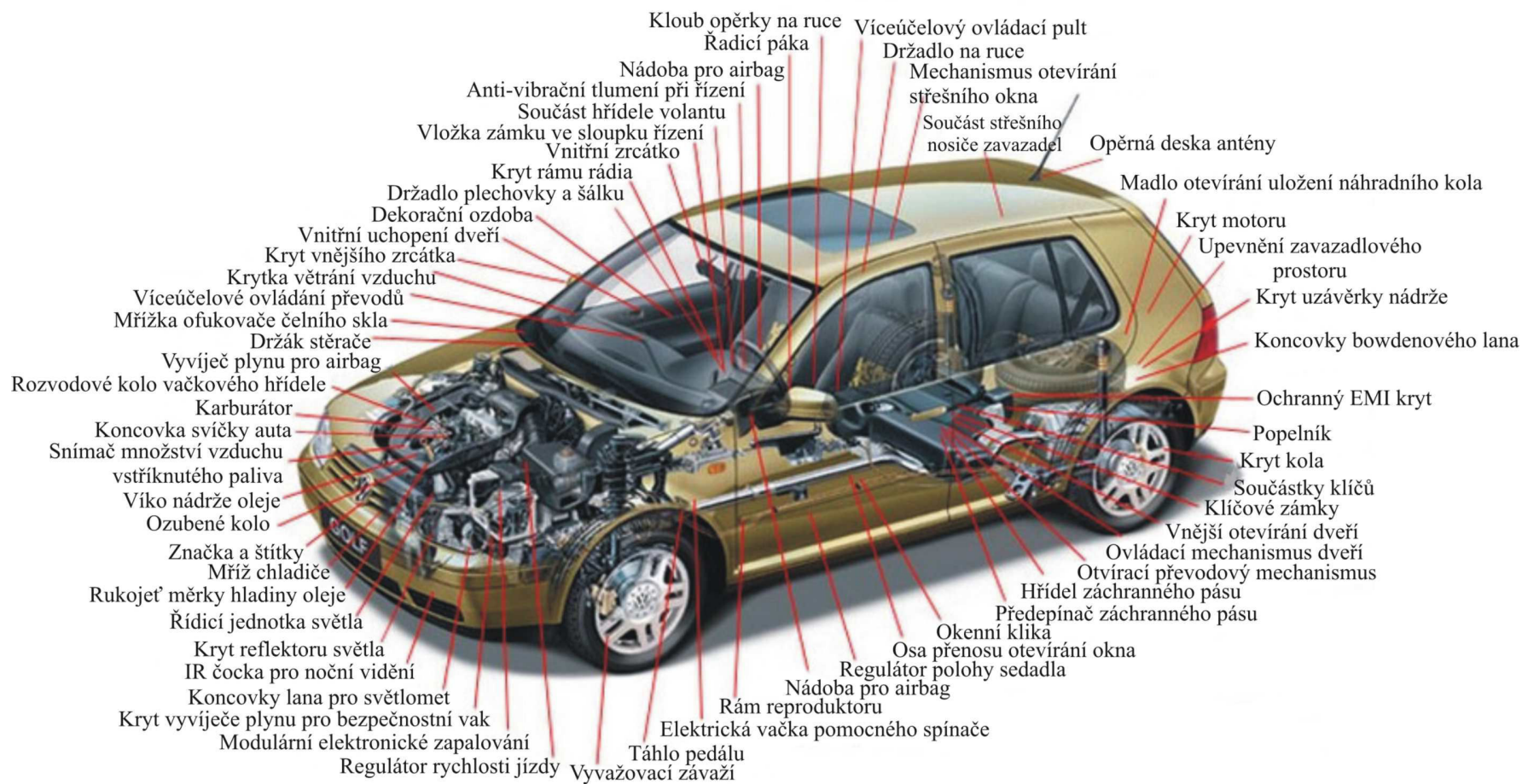


- [28] MURPHY, S.: Z. Metallkd, 1980, s. 96-102.
- [29] Podklady firmy NYRTSAR (Belgie)
- [30] KURĐUMOV, A.V., PIKUNOV, M.V., ČURSIN, V.M.: Litejnoje proizvodstvo cvetnyh I redkich matallov.1. vyd. Metalurgia Moskva 1982
- [31] BÁLEK, S.: Tepelně technické tabulky a diagramy. [Skripta], HF - VŠB Ostrava 1979.
- [32] VALECKÝ, J. A KOL.: Lití kovů pod tlakem. 1. vydání. Praha, 1963.
- [33] ČABELKA, J.: Mechanická technológia. 1. vyd. Bratislava /Praha, 1967.
- [34] ELBEL, T., HAVLÍČEK, F.: Hospodárné konstruování odlitků - co by měl vědět konstruktér o vzniku odlitku. Slévárenství 4/2007. s. 149 - 155. ISSN 0037-6825.
- [35] Podklady firmy FRENCH (Kanada)
- [36] Podklady firmy Tenza Adamov (Česká Republika)
- [37] Podklady firmy Eastern Alloys, Inc. (USA)
- [38] Podklady firmy TECKAST (USA)
- [39] Podklady firmy ALFE Brno (Česká Republika)
- [40] Podklady firmy TEOLI spol. s r.o (Česká Republika)
- [41] Poznámky z přednášek „Termodynamika metalurgických procesů“ FS, KSP TU v Liberci 2006.
- [42] NOVÁ, I: Teorie slévání 2.díl. Teoretické základy metalurgie slévárenských slitin. [Skripta], Liberec: FS-TU v Liberci, 2007. ISNB 978-80-7372-185-5.
- [43] PŘIBYL, J.: Řízené tuhnutí ocelových odlitků. 1. vyd. Praha, 1986.
- [44] NECHENZI, J. A.: Propriété de fonderie des alliages. Foundrie 271, 1968.
- [45] MYSLIVEC, T.: Fyzikálně-chemické základy ocelářství. 1. vyd. Praha 1976.
- [46] KALOUSEK, J., HOLUBEC, Z., KALOUSKOVÁ, G.: Fyzikální chemie metalurgických procesů. [Skripta], FS- VŠST Liberec 1982.
- [47] NOVÁ, I.: Tepelné procesy ve slévárenských formách. 1. vyd, VP, TU- v Liberci 2002. ISBN 80-7083-662-8.80.
- [48] ČERNOCH, S.: Strojně technická příručka. 3. upravené vydání, Praha 1977.
- [49] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P.: Nauka o materiálu I, Nauka o kovech. 2. svazek Vlastnosti kovů. 2. rozšířené a zcela přepracované vydání, Praha 1973.
- [50] JAREŠ, V.: Metalografie neželezných kovů. 1. vyd. Praha 1965.
- [51] Podklady firmy MAZAK Limited (UK).
- [52] MACÁŠEK, I.: Metalurgie litina neželezných kovů. [Skripta], VUT Brno 1981.



## **PŘÍLOHY**

## Automobil VW s vyznačením dílů - odlitků ze slitin zinku





## Příloha č. 2

### Hodnoty fyzikálních a chemických veličin čistého zinku [27]

Číslo	Veličina a symbol	Jednotky	Hodnota	Poznámka
1.	Atomové číslo	[1]	30	Zn
2.	Atomová hmotnost $m_A$	[1]	65,38	
3.	Atomový objem $V_A$	[cm <sup>3</sup> ]	15,104	
4.	Atomový poloměr $r_A$	[nm]	0,1333	
5.	Iontový poloměr $r_I$	[nm]	0,074 (Zn <sup>2+</sup> )	
6.	Vzdálenost atomů $a_A$	[nm]	0,2664	
7.	Elektronová konfigurace	[1]	1s <sup>1</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> 3p <sup>6</sup> 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>	
8.	Krystalová mřížka	[1]	hexagonální	
9.	Mřížková konstanta	[nm]	a = 0,266; c = 0,495	
10.	Koordinační číslo	[1]		
11.	Mocenství	[1]	2	
12.	Absorpční účinný průřez $\sigma_a$	[m <sup>2</sup> ]	110.10 <sup>-30</sup>	
13.	Rozptylový průřez $\sigma_r$	[m <sup>2</sup> ]	360 ± 40	
14.	Hustota $\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	7133	
15.	Teplota tání $T_T$	[°C]; [K]	419,5; 692,5	
16.	Teplota vypařování $T_V$	[°C]; [K]	906; 1179	
17.	Tenze par p (při teplotě 765 K)	[Pa]	133,32	
18.	Skupenské teplo krystalizace $L_{KR}$	[J.kg <sup>-1</sup> ]	100 850	
19.	Skupenské teplo vypařování	[J.kg <sup>-1</sup> ]	1 781 900	
20.	Molární teplo $C_p$ (při T = 298 K)	[J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	25,5	
21.	Měrná tepelná kapacita (při T = 298 K)	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	383	
22.	Entropie S (při T = 298 K)	[J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	41,65	
23.	Entalpie H	[J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	130 800	
24.	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ (při T = 291 K)	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	111,10	
25.	Součinitel délkové roztažnosti $\alpha$ (při T = 313 K)	[K <sup>-1</sup> ]	29,2.10 <sup>-6</sup>	
26.	Teplotní součinitel odporu $\alpha_R$	[K <sup>-1</sup> ]	4,20.10 <sup>-3</sup>	
27.	Pevnost v tahu $R_m$	[MPa]	127 až 196	
28.	Youngův modul pružnosti v tahu E (závisí na struktuře)	[MPa]	34 500 až 120 000	
29.	Tvrdost HB	[MPa]	300	
30.	Poissonova konstanta m	[1]	0,2 až 0,3	

### Historie zinku [29]

Zinek byl používán již v dobách před naším letopočtem. Zinkové rudy a soli byly známé pro jejich dobré lékařské účinky v oblasti hojení ran a bolesti očí.

Zpracování zinkové rudy nastalo mnohem později, než byla používána měď (Cu), jejíž tavení a technika výroby byla dobře známa již v období 3000 let před naším letopočtem a z tohoto období jsou známy i slitiny mědi a zinku. *Babyloňané byli schopni vytvořit slitiny z mědi, cínu a zinku redukcí dřevěného uhlí.* V oblastech, které v dávných dobách odpovídaly poloze Babylonii a Assyrii byly objeveny předměty z mosazi, jejichž výroba je odhadována na dobu 3000 let před n.l. Také mosazné předměty nalezené na území Turecka a Palestiny pocházejí z doby 1400 až 1000 před n.l.

Objevení zinku, pro technické účely je datováno k období roku 1530, avšak zprávy o první tavbě zinku jsou spojovány až s první polovinou 18. století.

#### 1000 až 200 let před n.l.

Z doby 1000 let před n.l. pochází starověký obraz vyrobený z materiálu obsahujícího 87,5 % zinku. Tento obraz byl nalezen v prehistorických rozvalinách v Transylvánii, východní Evropa.

Z tohoto období pochází také technika výroby mosazi na Středním východě (Kypr, Turecko, Palestina). Mosaz byla používána na mince a ozdoby. Tavení zinkové rudy s mědí bylo patrně objeveno na Kypru a později používáno Římany. Mosaz byla vyráběna ohříváním směsi práškového uhličitanu zinečnatého, dřevěného uhlí a zrněk mědi. Mosaz se používala na mince, ozdoby a na výrobu zbraní. Římané psali, že mince vyrobené z této mosazi ("orichalum") byly k nerozeznání od zlatých mincí.

#### 500 - 200 let před n.l.

Z tohoto období pochází objevy slitin zinku v Řecku. Aristoteles (382 až 322 před n.l.) mluvil o oslnivém bílo-měďnatém produktu, který nebyl vyroben tavením cínu s mědí, ale s přídavkem "nějakého druhu hlíny".

Stříbřitě lesklé náhrdelníky nalezené na ostrově Rhodos jsou na bázi zinku a jsou datovány do roku 500 před n.l.

#### 200 let před n.l.

Z tohoto období je známá výroba mosazi v Římě. Tavba zinečnatých rud s mědí byla patrně objevena na Kypru a později používána v Římě. V tradičním procesu výroby mosazi (slitiny zinku a mědi) byl používán uhličitan zinečnatý (kalamín). Tento kalamín neměl být rozpoznán jako zinková ruda, ale dříve byl považován jako příměs, která dala červené mědi typicky nažloutlou barvu. Těžba a oddělování zinkové rudy bylo v této době nemožné.

Kvůli samovolné redukci zinku v přítomnosti oxidů je odloučení kovového zinku z těchto rud pyrometalurgií mnohem více obtížné, než u jiných v té době dobře známých kovů (železo, měď olovo). Ve skutečnosti, zinek se vypařuje při teplotě 1000 °C, tato teplota je však potřebná při tavení zinkové rudy. Z toho vyplývá, že výroba zinku tímto způsobem byla nemožná.

## Příloha č. 3

### pokračování

Římané byli schopni pouze výroby mosazi smícháním a ohříváním mědi, dřevěného uhlí a zinkové rudy v nístějových pecích. Zinek byl vytvářen na základě redukce jeho kysličníků, které byly absorbovány mědí a tvořily mosaz. Zinek v té době se neobjevil jako samotná složka.

### Okolo roku 1200 našeho letopočtu

Přibližně z tohoto období pochází popis výroby kovového zinku v indské knize *Rasarnava*.

Roku 1248 popisuje Albert Magnus „zbarvení mědi“ světlejší, resp. zlatou barvou. Albertus Magnus popisuje způsob, jak kalamín nebo surový kysličník zinečnatý v peci by mohl být použit pro zbarvení mědi do zlatového odstínu. On předpokládal, že zlatový lesk mědi by mohl být docílen postříkáním rozdrčeného skla na povrch směsi v tavící peci formou strusky, která bude pomáhat předcházet odvod zinkových par. Jinými slovy se zvětší obsah zinku v mosazi.



Schématické zobrazení indské metody redukce zinku

### 1280 až 1300 našeho letopočtu

Marco Polo popisuje v Persii výrobu oxidů zinku. Tento oxid zinečnatý byl používán v Persii na přípravu roztoku síranu zinečnatého ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , nazýván „tutia“), který byl používán pro hojení bolavých očí.

### 1400 našeho letopočtu

Z tohoto období pochází popis efektivních metod pro kondenzaci par v kapalných kovech.

Další indská práce *Rasaratnassamuchchaya*, text připsán velkému indickému vědci Nagarjuna. Ranné křesťanství popisuje tuto metodu výroby zinku jako nový „tin-like“ kov, který je vyroben nepřímo ohřevem kalamínu s organickou látkou v kryté peci vybavenou kondenzátorem. Zinečná pára byla vyvinuta a vzduchem ochlazována v kondenzátoru pod krytou pecí.

V roce 1374, byl zinek uznán úplně novým kovem, byl to osmý známý kov v té době. K tomuto časovému období se pravděpodobně vztahuje první rozsáhlá výroba kovově čistého zinku v Zawar v Rajasthan (Indie), která se zde prováděla od 12 do 16 století. Zde byly také nalezeny zbytky „moderního“ tepelného tavícího zařízení, která se datují k počátku 14. století

Zinečná ruda byla vyráběna v malých trubkovitých hlinitých retortách (25 cm dlouhých, 15 cm v průměru, tloušťka stěny 1 cm) redukujících kalamín (uhličitan zinku,  $\text{ZnCO}_3$ ) s organickou látkou. Později zinek byl vyloučen a soustředěn kondenzačně v malém průměru v tubě, která byla izolovaná v otevřeném konci této hlinité retorty.

Tavený zinek a oxid zinku byly dále zpracovávány. Zinek byl používán pro výrobu mosazi a oxid zinku byl používán v medicíně. Metalurgové odhadují celkovou těžbu v Zawaru během 4. století na více než 100 000 tun kovového zinku a oxidu zinku. Tento odhad výroby byl založen na 130 000 tunách zbytku, které byly nalezeny v Zawaru.

### 1500 až 1600 let našeho letopočtu

V tomto období došlo k posunu výroby zinku z Indie do Číny, kde byla vyvinuta jako potřebný doplněk ve výrobě mosazi. Patrně Číňané se učili o výrobě zinku někdy okolo 1600 let našeho letopočtu. V encyklopedii vydané okolo let 1570 až 1590 nebyla uvedena zmínka o zinku, ale kniha *Tien-kong-kai-ou* související s výrobou zinku byla publikována až v 17. století. Kalamínová ruda smíchaná s dřevěným uhlím ve formě prášku byla umístěna v hliněné nádobě a ohřívána do vývinu zinkové páry. Tavicí kelímky byly naskládány do výšky jako pyramida s hromadou dřevěného uhlí mezi nimi, a poté ohřívány až do červeného žáru, chlazeny a rozbíjeny.

Také archeologické nálezy mincí z Ming Dynastie z období 1368 až 1644 obsahují 99 % zinku a 1 % stříbra.

### 1540

Z tohoto období se uchoval popis výroby mosazi od Biringucciho. Popisoval jak kalmín (kysličník zinečnatý) mohl být smíchaný s kousíčky mědi a pokapaný vrstvou práškového skla, pak zahříván v uzavřeném tavicím kelímku po dobu 24 hodin.

### 1546

Mineralog Georgius Agricola (1494 až 1555) popisoval kondenzaci zinku během zušlechťování stříbra a olova. V roce 1546 napsal ve své práci *“De natura fossilium”*, že bílý kov byl kondenzován a seškrabán při cestě k peci, když Rammelsbergova ruda byla roztavena v Harzských horách (Německo) získáním olova a stříbra, které dostalo jméno *“contrefey”*, protože to bylo používáno jako imitace zlata. Toto se často skládá z kovového zinku, ačkoli nebyl znám jako takový. Agricola pozoroval, že podobný kov nazývaný *“zincum”* byl vyroben za stejných podmínek ve Slezsku. 1530 až 1540

Švýcarský alchimista Paracelsus (Philippus Aureolus Theophrastus Bombast von Hohenheim) jako první potvrdil *“zincum”* (zinek) jako nový kov. Paracelsus (1493-1541) byl první Evropan, který jasně uvedl, že *“zincum”* je nový kov a současně uvedl, že má odlišné vlastnosti od ostatních, již známých kovů.

**Okolo roku 1600**

V této době si již evropští vědci uvědomovali existenci zinku. Všechny jimi jakkoliv zkoumané kovy byly pravděpodobně dováženy z Orientu portugalskými, holadskými a arabskými obchodníky. V to době se objevovalo i mnoho různých názvů, které nesouvisely přímo s názvem míst nalezišť zinkové rudy. Tyto názvy zahrnovaly označení surového zinku (tutenag - odvozeno z Perského tutiya; kalmínu, který byl v Anglii znám jako surový kysličník zinečnatý, oxid zinku) a zinek (pravděpodobně podobně zbarvený jako olovnato-cínová slitina, cínová slitina nebo holandská obdoba - spiauter nebo indický cín, který britský vědec Robert Boyle latinsky vyhláskoval v roce 1690, ze kterého je obchodní název spelter, komerční název "zinek". Slovo tutia, starý název oxidu zinku, je odvozen z perského slova, tzn. kouření a odkazuje na fakt, že oxid zinku je vyvinut jako bílý kouř, když zinkové rudy jsou praženy s dřevěným uhlím.

**1700**

Z tohoto období je známý objev procesu galvanizace italským fyzikem Luigi Galvanim. Tento proces je dnes jedním z používaných, kdy zinkem se galvanicky pokovuje ocelový plech. V té době to byla první aplikace zinku na železo, zinek vytvářel ochranný „nátěr“ na kov. V té době také německý doktor medicíny Johan Friedrich Henckel (1644-1744) popsal zinek s ohledem na jeho léčivý účinek.

**1743**

K tomuto datu se vztahuje vývoj výroby zinku metodou ve vertikálních retortách. Znalost přípravy zinku k tavení v retortách byla získána jistým Angličanem (z východní Indické společnosti) navštěvujícího Čínu a Indii v letech před rokem 1740.

Základní popis vývoje vertikální retortové výroby (destilací ve speciální hliněné nádobě při určité teplotě) popsal William Champion (1709-1789). Zajímavé je, že metoda výroby adoptovaná sestupnou destilací nese výraznou podobnost se Zavar výrobou a jak bylo ukázáno, Championova výroba byla pravděpodobně velmi inspirována výrobou v Zavar. Postup a základ první výroby zinku (první průmyslová laboratorní výroba) ve Wormley, Bristol (Anglie) v roce 1743 provedl Williamem Championem. Kapacita výroby byla okolo 200 tun ročně. Dávka kalamínu a uhlíku byla uzavřena do jílového tavícího kelímku s otvorem ve dnu. Ten byl utěsněn na železnou trubku vsunutou pod kelímkovou pec do chladírny pod pecí. Uzavřený konec železné trubky seděl v kádi vody a zde byl soustředěn kovový zinek. Destilace trvala celkem asi 70 hodin za zisku 400 kg kovu ze všech 6 tavících kelímků umístěných v peci. To byl začátek průmyslové výroby zinku v Anglii, který byl soustředěn převážně v oblasti Bristolu a Swansea.





Výroba zinku podle W. Championa

**1746**

Německý chemik Andreasem Sigismundem Marggrafem separoval zinek jako samostatný kov. Během experimentálních prací, Marggraf ohříval zinkovou rudu (odlišný kalamín z Polska, Anglie, Wroclawi a Maďarska) s dřevěným uhlím v uzavřené retortě a byl z nich získán kovový zinek. Marggraf vyvinul základní experimentální postup prvního technického procesu pro tepelnou rafinaci zinku. Tento proces, který byl popsán v detailu v rozsáhlém výzkumu “Metoda získávání zinku ze skutečných minerálů, kalamínu” stanoveného základem teorie výroby zinku.

**1758**

John Champion, Williamův bratr, patentoval žhání sulfidem oxidu zinku při použití procesu v retortě. V roce 1738 podal William Champion patent, který byl vyjádřen v cizím jazyce a v roce 1758 patentoval jeho bratr John. Ten poskytl více specifický detail potřebný k oddělení sfaleritu zinku od ostatních minerálů a kamenů a žháná (páleno) před odkysličeným kovového zinku. Pražení nebo žhací proces byl používán k přeměně sulfidu zinečnatého ( $\text{ZnS}$ ) na oxid zinku ( $\text{ZnO}$ ), to uvolňuje velké množství oxidu siřičitého. Dříve mnoho pražicích továren nedělala žádná opatření na zachycení oxidu siřičitého a uvolňování těchto kyselých plynů způsobilo zničení tamního rostlinstva. Tento patent byl založen na komerční výrobě zinku, která pokračovala až do 20. století.

**1798**

Hlavní technologický pokrok přišel s vývojem německého vědce Johannem Rubergem (1751-1807), který postavil v roce 1798 první dílnu na tavení zinku ve Wessole, Horní Sasko, a využíval proces horizontálních retort, jím vyvinutých. Princip zvyhodňující tuto techniku je, že retorty byly upevněny horizontálně do pece, což je dovolovalo vkládat a vykládat bez chlazení. Toto umístění retort umožňovalo značné zvýšení výkonnosti paliva. Jako surovina

## **Příloha č. 3**

### **pokračování**

pro výrobu zinku zpracování byl použit smithsonit (kalamín), jako vedlejší produkt z výroby olova a stříbra. Později, se pravděpodobně pro výrobu zinku se přímo používal těžený smithsonitu, jako snadno tavící se materiál. Pak následovala výroba zinku přímo ze sfaleritu, který měl být prvně převeden pražením na oxid. Pak následovaly popisy dalších tavících metod používaných v okolí nalezišť Liege v Belgii, nebo v okolí německých měst Aachen, Rhinelandu a Ruhr .

### **1805**

Byla postavena v roce 1850 první belgická továrna Jean-Jacques Daniel Dony (1759-1819) a také používala horizontální retorty, ale poněkud odlišné konstrukce.

Největší továrna na výrobu zinku pochází z roku 1810, která byla předchůdcem Societé de la Vieille Montagne (Francie), která o několik let později se stala největším výrobcem v produkci zinku na světě.

### **1814**

Jöns Jakob Berzelius (1779-1848), švédský chemik, navrhl přidat zinek jako nový prvek do Mendělejevovy tabulky s chemickou značkou Zn a latinským názvem Zincum. Znamení odolnost zinku k atmosférické korozi brzy vedla k jeho použití v povrchových úpravách materiálů. V roce 1805 bylo odszkoušeno tváření zinku válcováním při teplotách 100 až 150 °C a první válcovací stolice byla postavena v roce 1812 v Belgii.

### **1832**

Německý metalurg Georg Fredrick Muntz (1794-1857) v roce 1832 vynalezl kov, resp. slitinu, která obsahovala 60 % mědi, 37 % zinku a 3 % olova. V podstatě to je speciální druh mosazi, která se dnes označuje Muntzův kov, je používán jako obrana trupů lodí.

### **1836**

V tomto roce bylo předvedeno ve Francii žárové zinkování jako antikorozní proces pro ochranu ocelí před korozi. Dnes tento proces je jedním z účinných průmyslových metod ochrany povrchů železných, resp. ocelových výrobků.

### **1743 až 1851**

Výroba a rafinace zinku metodou v horizontálních retort v Anglii a na Evropském kontinentu. Postup výroby zinku metodou vertikálních retort, vyvinutý Championem, pokračoval v používání až do roku 1851. Byl však málo energeticky výhodný (spotřeba 24 tun uhlí na 1 tunu vyrobeného zinku) a denní výkon každé retorty byl okolo 40 kg. Několik stovek retort bylo nakloněných dohromady a zapálených plynem. Proces byl též i fyzicky náročný.

### **1850**

Od tohoto data se traduje začátek výroby zinku v USA používáním belgického procesu. Výroba v USA se brzy stala největší ve světě s pomocí bohatých zinkových nalezišť. V roce 1907, světová výroba zinku byla 737 500 tun, do které přispívalo USA 31 %, Německo 28 %, Belgie 21 %, Anglie 8 % a ostatní státy 12 %. V té době také Německo mělo být hlavním světovým výrobcem zinku, zůstalo pozadu.

### **1915 až 1918**

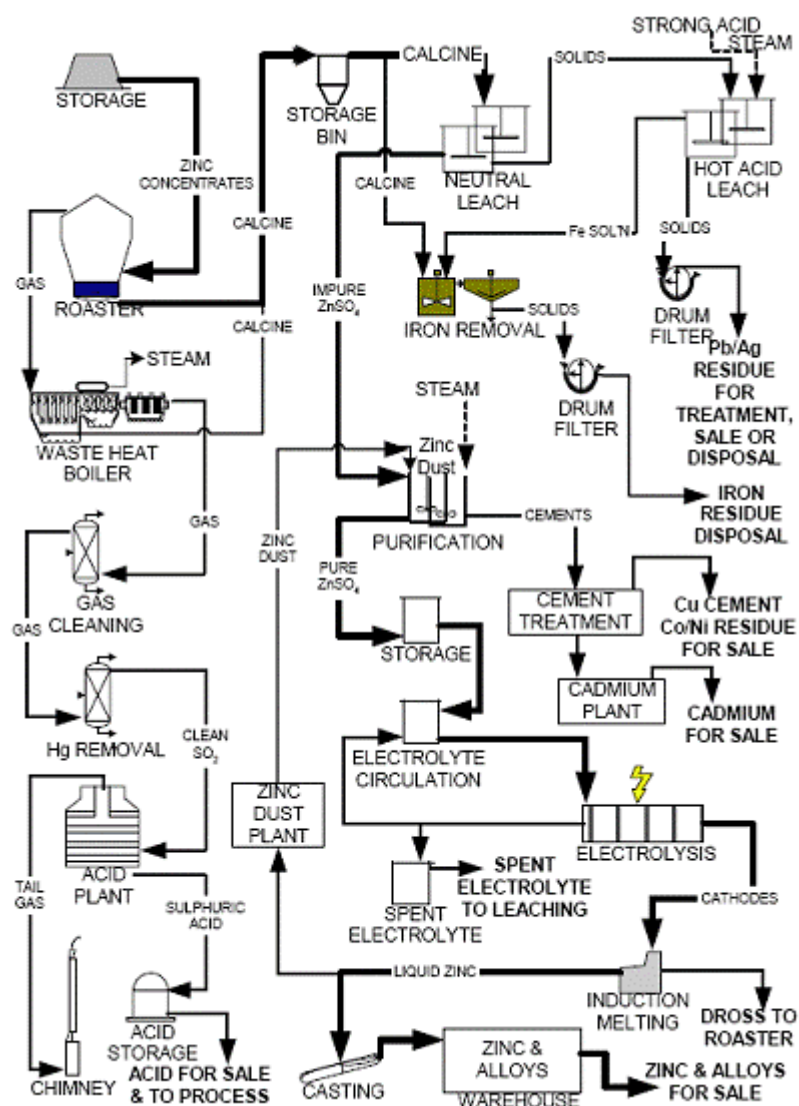
Byl představen Francouzem Léonem Letrangem nový komerční způsob výroby zinku založený na procesu pražení-rozpouštění-elektrolytického získávání kovů, tzv. elektrolýzou. Tato technologie průmyslové výroby zinku byla použita během první světové války. Předtím již byly udělány úspěšné pokusy a metoda byla patentovaná na elektrolýze sulfidu zinku Letrangem již v roce 1881, avšak průmyslová výroba zinku byla zahájena díky rozvoji potřebné techniky až roku 1915.

### **Polovina 20. století**

Časté dřívější pokusy, kterými byla sledována možnost využití vysokopecních procesů pro výrobu zinku selhaly, protože páry zinku obsahovaly značné množství oxidu uhličitého. Tato situace byla překonána v polovině 20. století při vývoji výroby zinku pomocí rychlého ochlazení pece plynem a absorbování zinkových par do roztoku tekutého olova. To umožnilo, že speciální „vysoká pec“ se stala hlavním metalurgickým prvkem pro výrobu zinku. Provoz této pece se odvozuje od manipulace míchání zinko-olověného vstupního materiálu v poměru 2:1 (zinek:olovo).

Z roku 1980 je známo zpřesnění procesu lakového loužení a elektrolytického získávání kovů.

Schéma výroby čistého zinku [11]



## Příloha č. 5

### Srovnání důležitých vlastností dnes nepoužívanějších slitin zinku a hliníku [14]

Vlastnosti	DIN EN 12844	DIN EN 1706
	ZnAl4Cu1	AlSi9Cu3
Pevnost v tahu [MPa]	330	(min.) 220
Tažnost A <sub>50</sub> [%]	5	(méně než) 1
Tvrдость podle Brinella (HSB 500-10-30)	92	(min.) 80
Mez kluzu 0,2 [MPa]	250	(min.) 140
Hustota [kg.dm <sup>-3</sup> ]	6,7	2,75
Teplená vodivost [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	110	110 až 130
Elektrická vodivost % IACS [MS.m <sup>-1</sup> ]	26	13 až 17

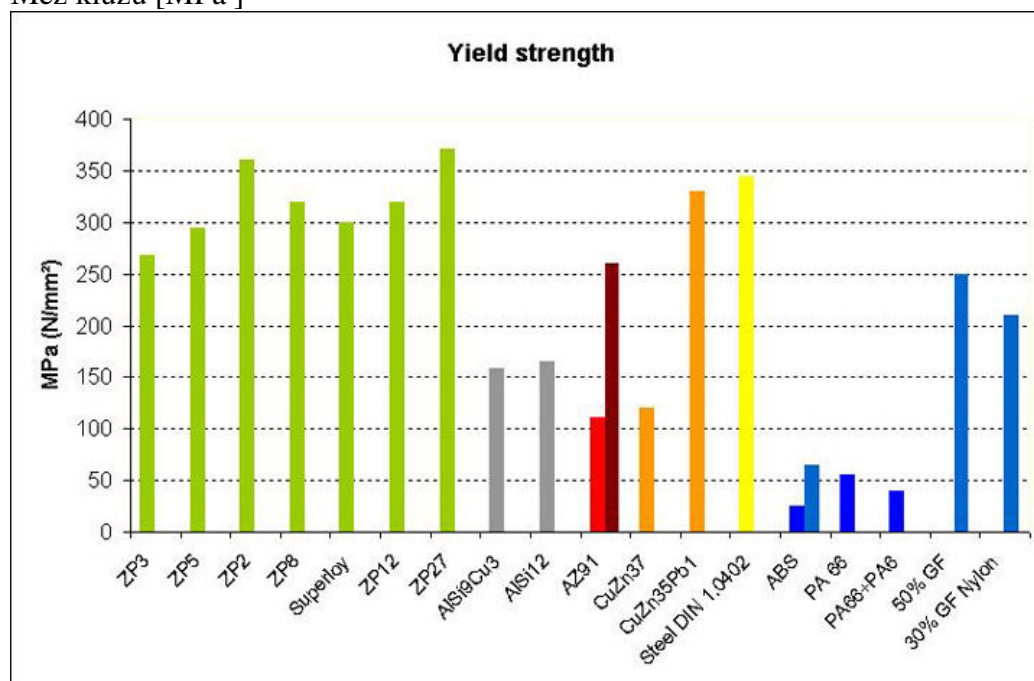
### Porovnání vlastností slitin zinku s dalšími materiály (slitiny hliníku, hořčíku, mosaz, ocel a plastické hmoty) [29]

Charakteristika vybraných slitin zinku, hořčíku, mosazi, oceli a plastických hmot												
	Označení	Norma	Al%	Cu%	Mg%	Zn%	Mn%	Fe%	Si%	Ni%	Cu%	Pb%
Slitiny zinku	ZP3	EN12844	3,7-4,3	<0,05	0,02-0,06	balance	-	<0,05	<0,03	<0,02		<0,005
	ZP5	EN12844	3,7-4,3	0,7-1,25	0,02-0,06	balance	-	<0,05	<0,03	<0,02		<0,005
	ZP2	EN12844	3,7-4,3	2,7-3,3	0,02-0,06	balance	-	<0,05	<0,03	<0,02		<0,005
	ZP8	EN12844	8,0-8,8	0,9-1,1	0,015-0,03	balance	-	<0,05	<0,045	<0,02		<0,006
	Superloy	Umicore	6,4-7,0	3,0-3,5	<0,05	balance	-	<0,05	<0,03	<0,02		<0,005
	ZP12	EN12844	10,5-11,5	0,9-1,5	0,015-0,03	balance	-	<0,07	<0,06	<0,02		<0,006
	ZP27	EN12844	24-27	2,0-2,5	0,01-0,02	balance	-	<0,1	<0,08	<0,02		<0,006
Slitiny hliníku	AlSi9Cu3	EN1706	balance	3,0-4,0	<0,30	<3,0	<0,5	<1,3	7,5-9,5	<0,5		
	AlSi12	EN1706	balance	3,0-4,0	<0,1	<1,0	<0,1	<0,6	10,5-12	<0,5		
Slitina hořčíku	AZ91	EN1753	8,3-9,7	<0,030	balance	0,35-1,0	0,15-0,50	<0,005	<0,10	<0,002		
Mosaz	ISO CuZn37			60-65		30-37						<1
	ISO CuZn35Pb1			60-65		30-37		<0,1				0,8-1,4
Ocel	DIN 1.0402						0,3-0,6				0,17-0,23	
Plastické hmoty	ABS	ISO 1874										
	PA 66	ISO 1874										
	PA66+PA6	ISO 1874										
	50% GF	ISO 1874										
	30% GF Nylon	ISO 1874										

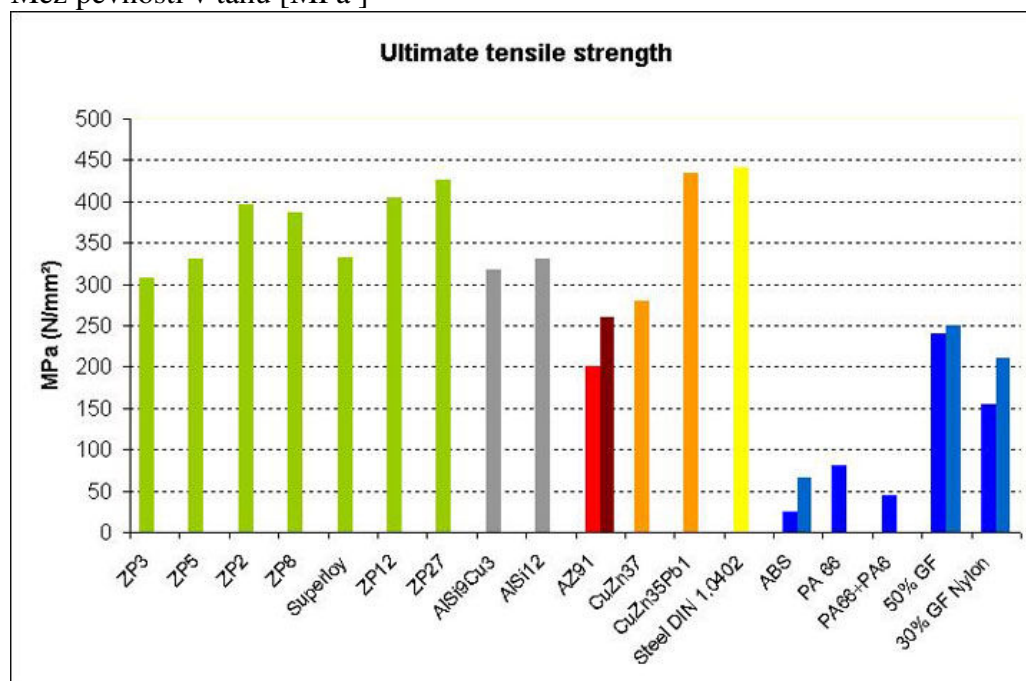
Nota: values indicated in the graph for the zinc alloys ZP3/ZP0400/ZnAl4, ZP5/ZP0410/ZnAl4Cu1, ZP2/ZP0430/ZnAl4Cu3, ZP8/ZP0810/ZnAl8Cu1 and Superloy are minimum values.

**Mechanické vlastnosti vybraných konstrukčních materiálů [29]**

Mez kluzu [MPa ]



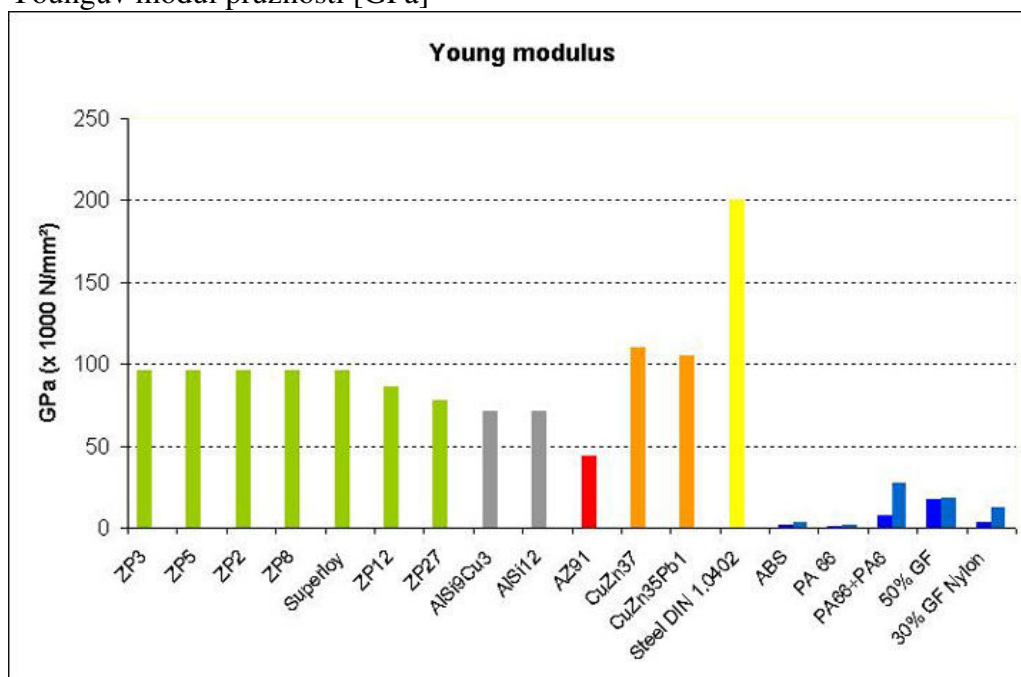
Mez pevnosti v tahu [MPa ]



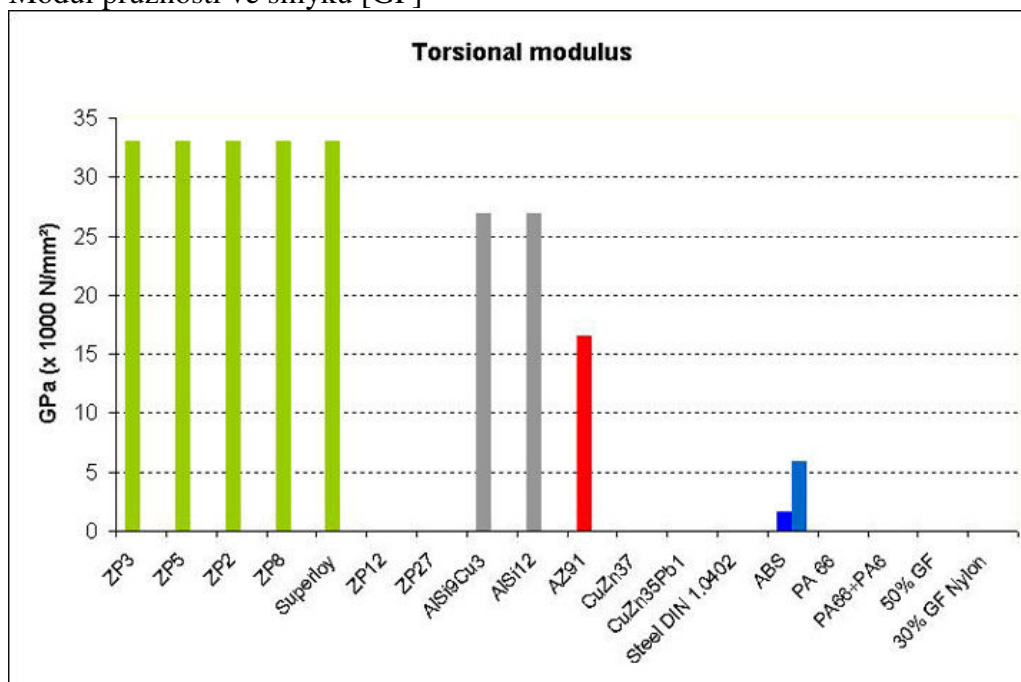
## Příloha č. 5

pokračování

Youngův modul pružnosti [GPa]



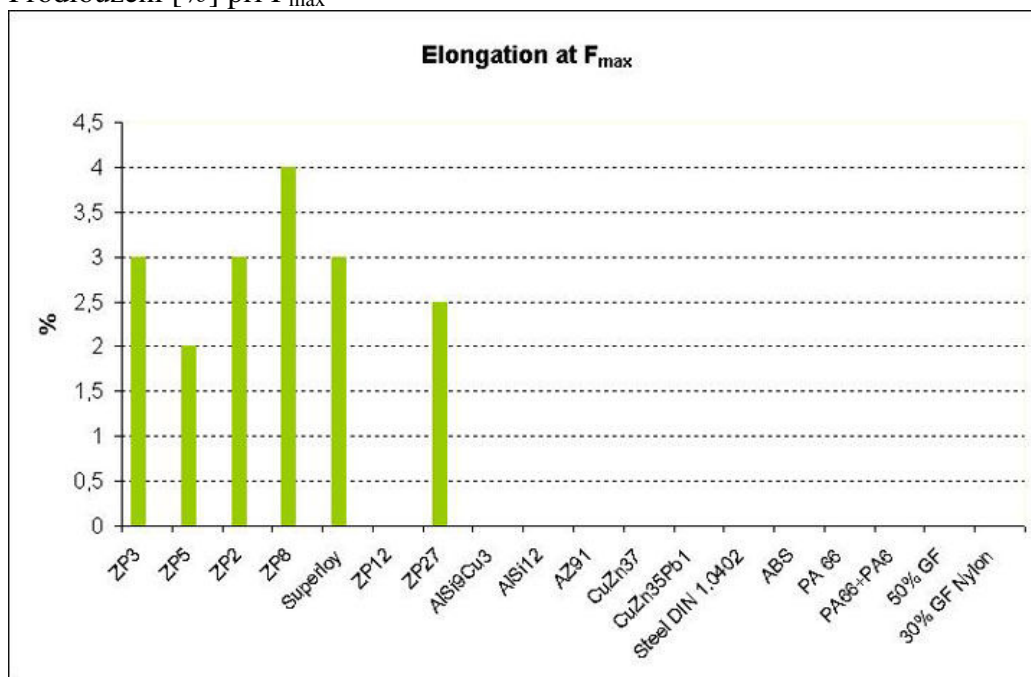
Modul pružnosti ve smyku [GP]



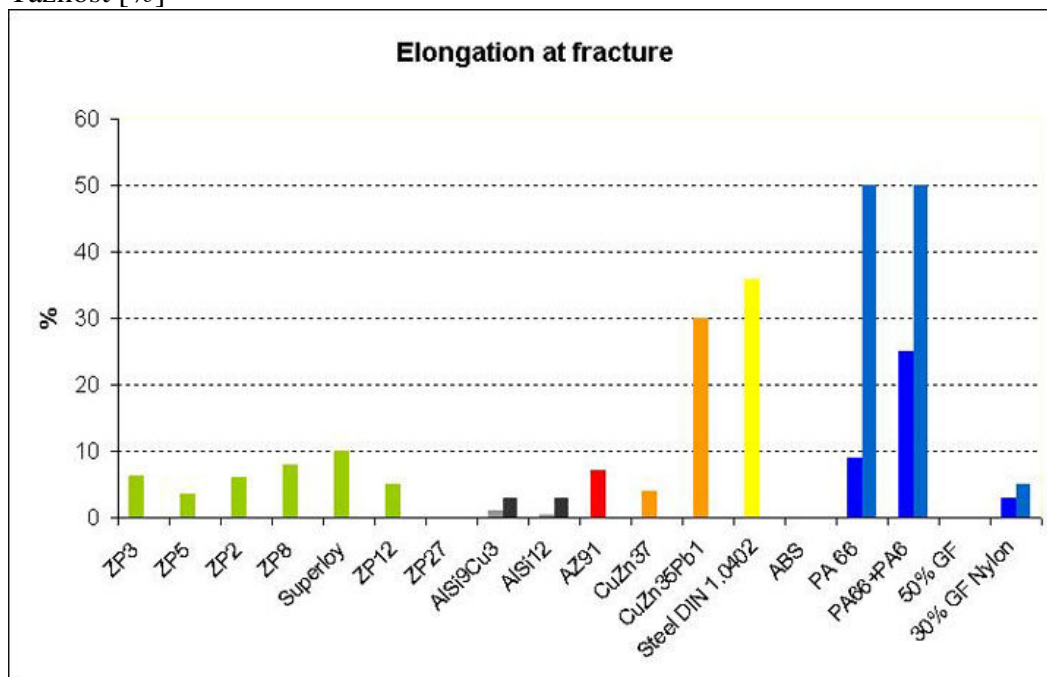
## Příloha č. 5

pokračování

Prodloužení [%] při  $F_{\max}$

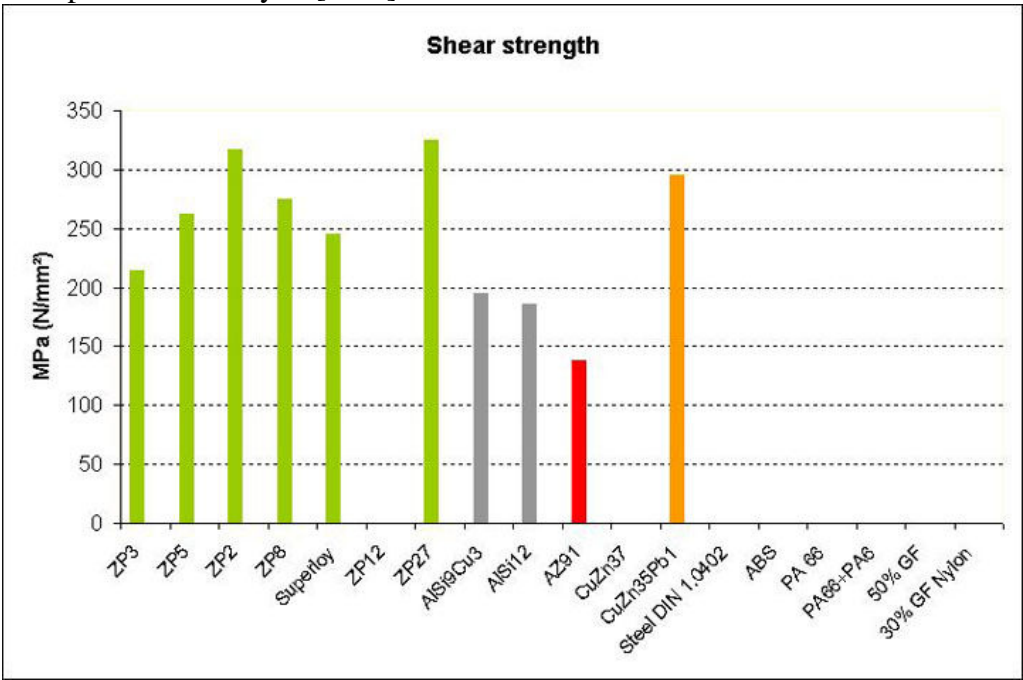


Tažnost [%]

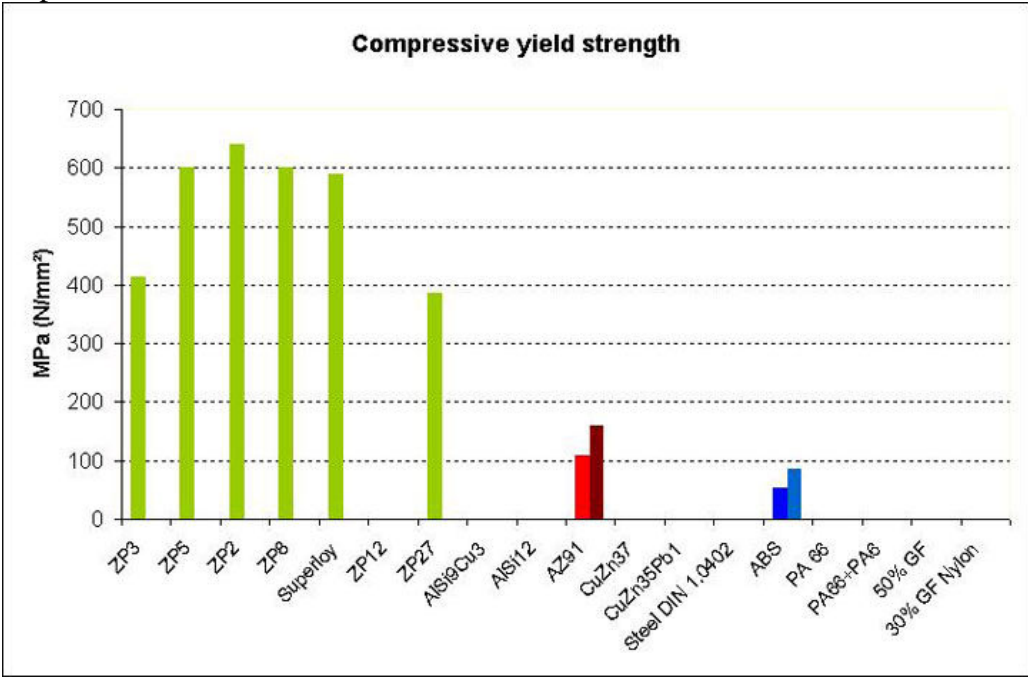




Mez pevnosti ve smyku [MPa]



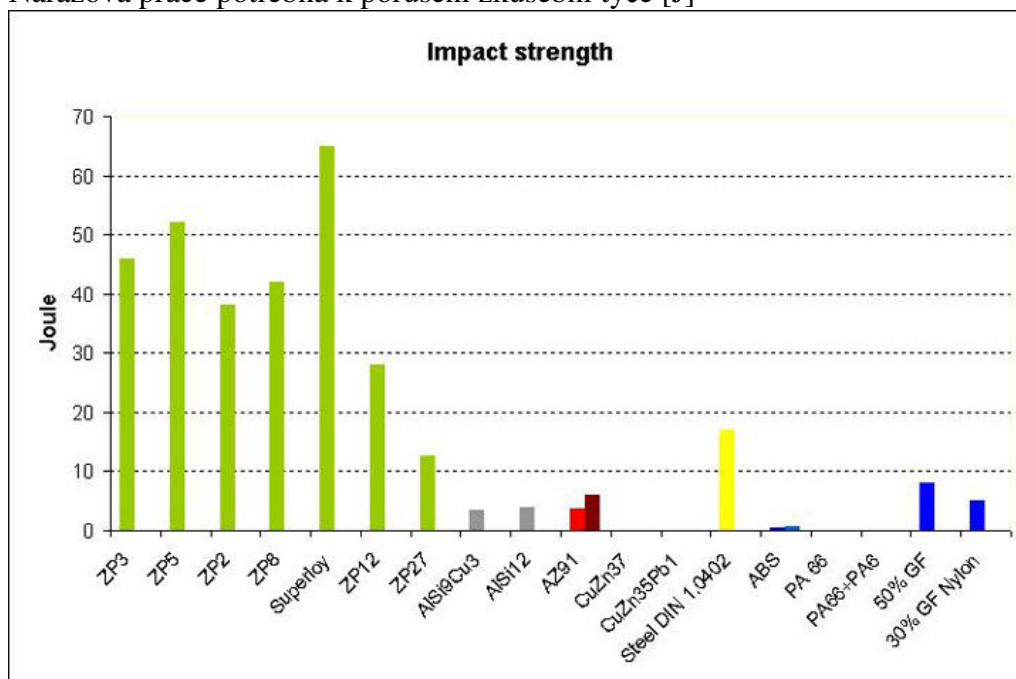
Napětí v tlaku [MPa]



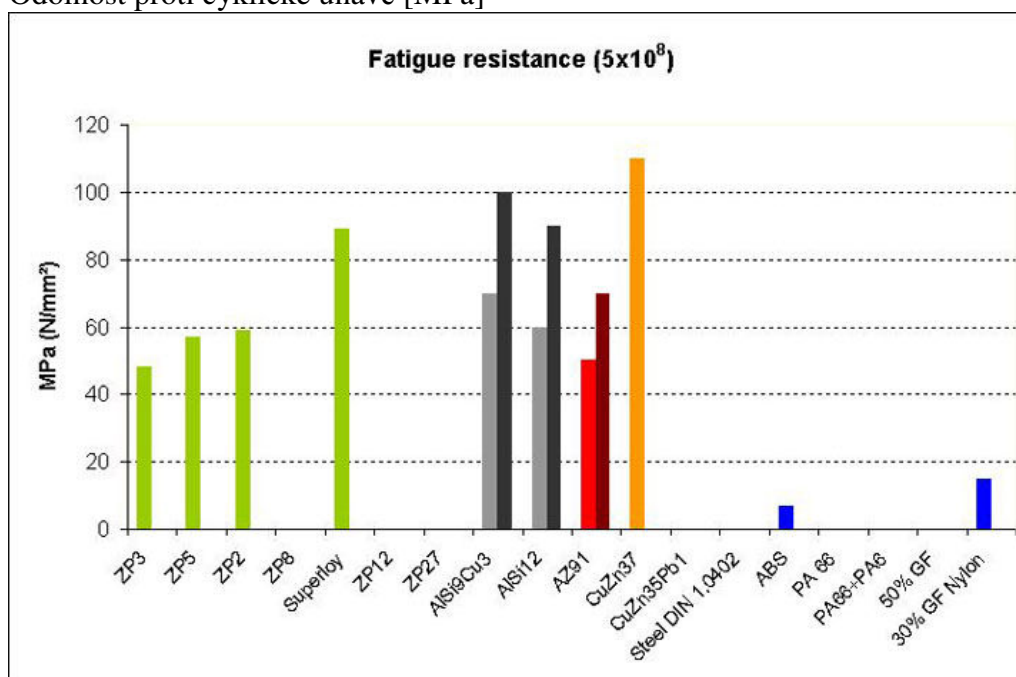
## Příloha č. 5

pokračování

Nárazová práce potřebná k porušení zkušební tyče [J]



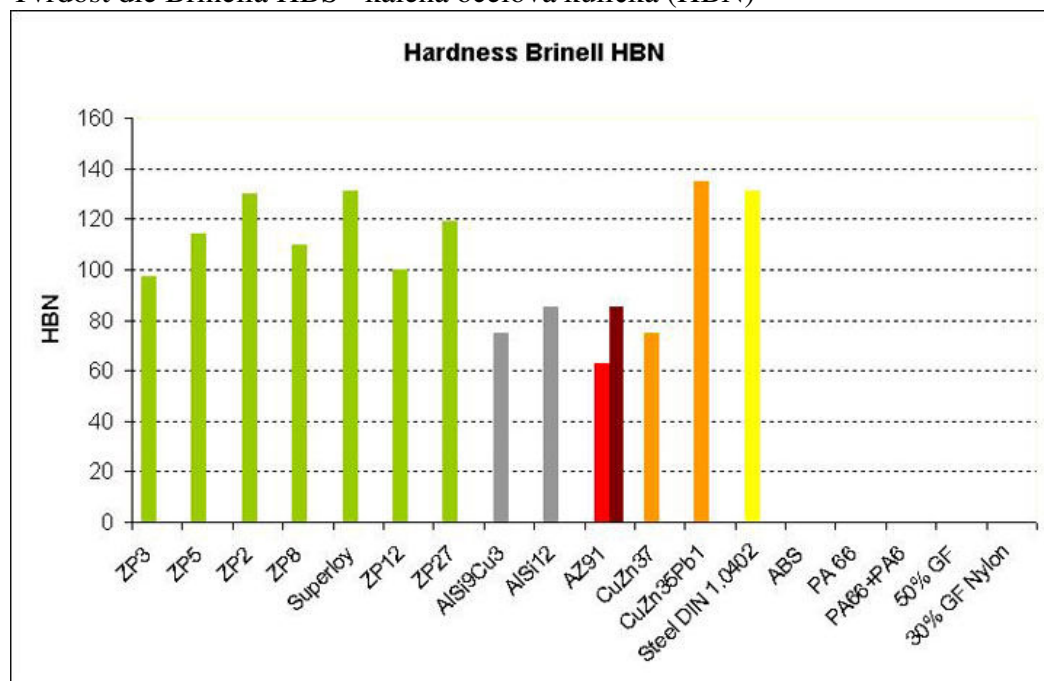
Odolnost proti cyklické únavě [MPa]



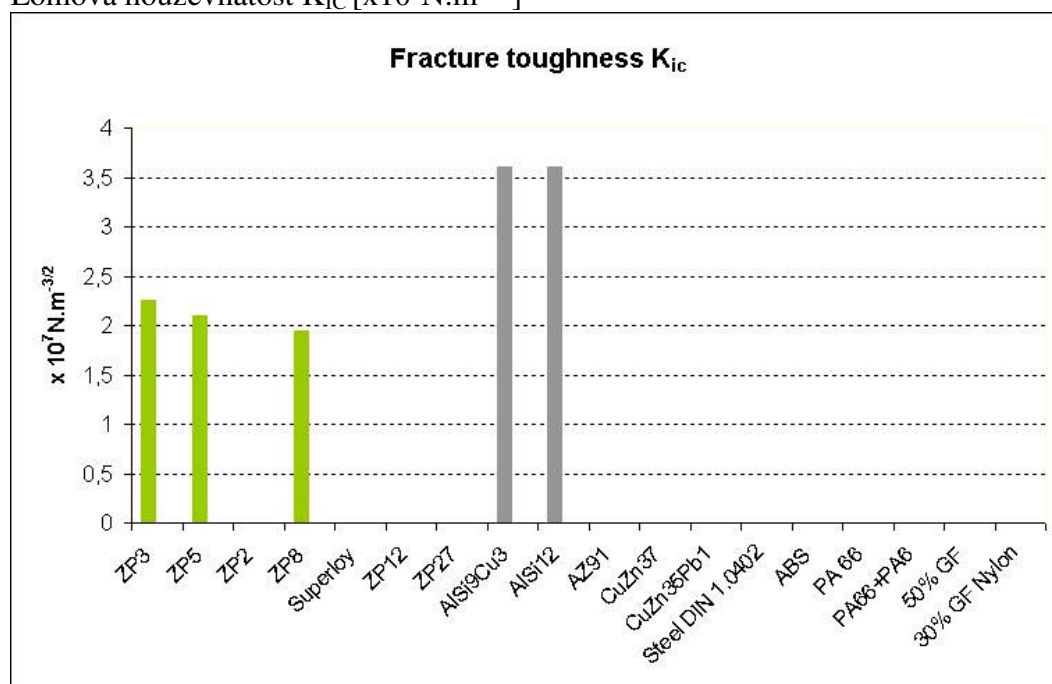
## Příloha č. 5

pokračování

Tvrdość dle Brinella HBS - kalená ocelová kulička (HBN)



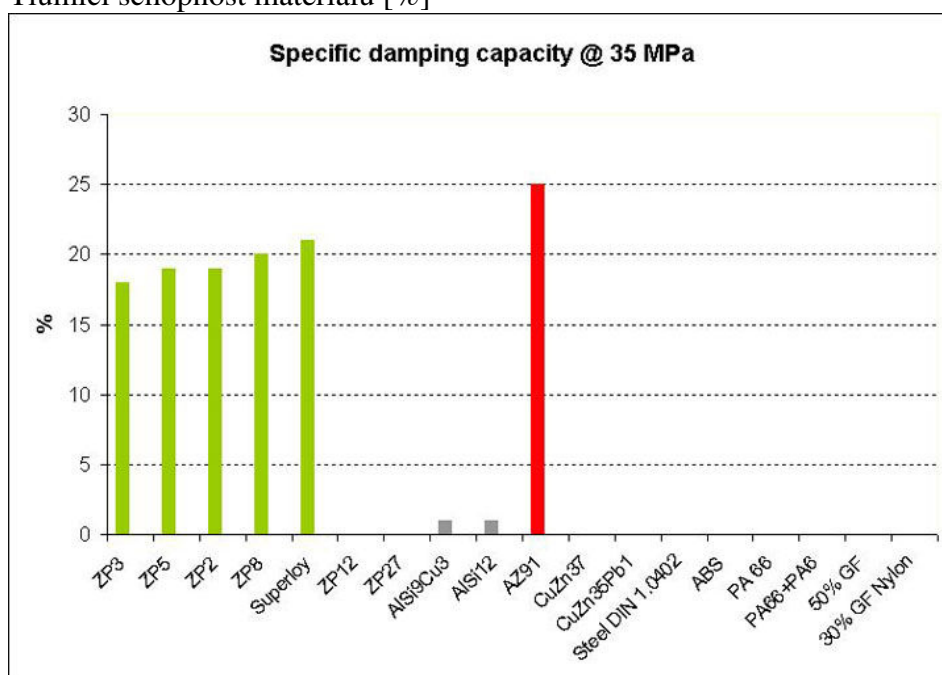
Lomová houževnatost  $K_{IC}$  [ $\times 10^7 \text{N.m}^{-3/2}$ ]



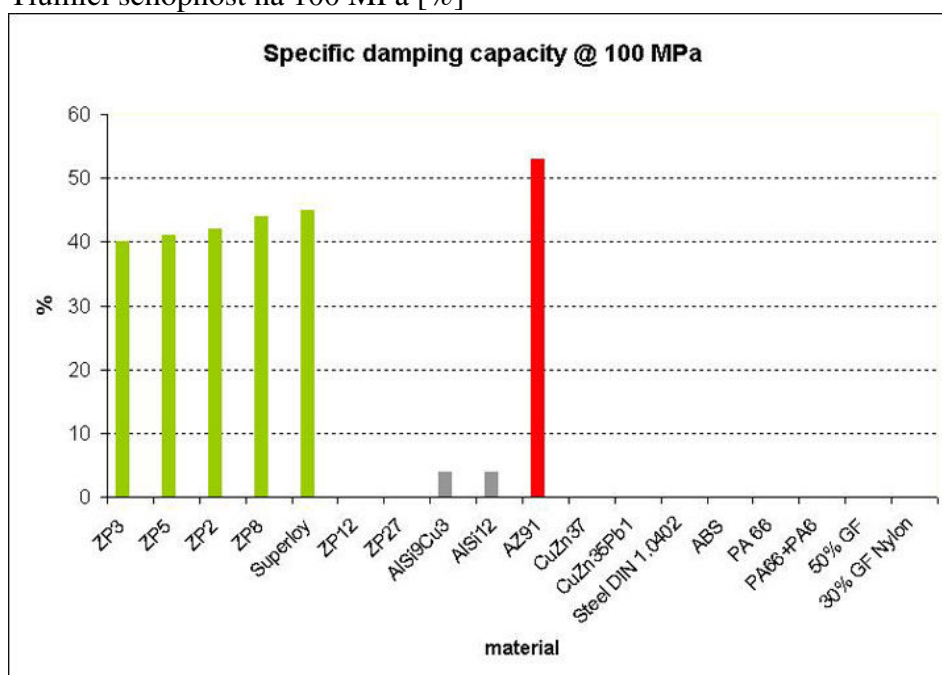
## Příloha č. 5

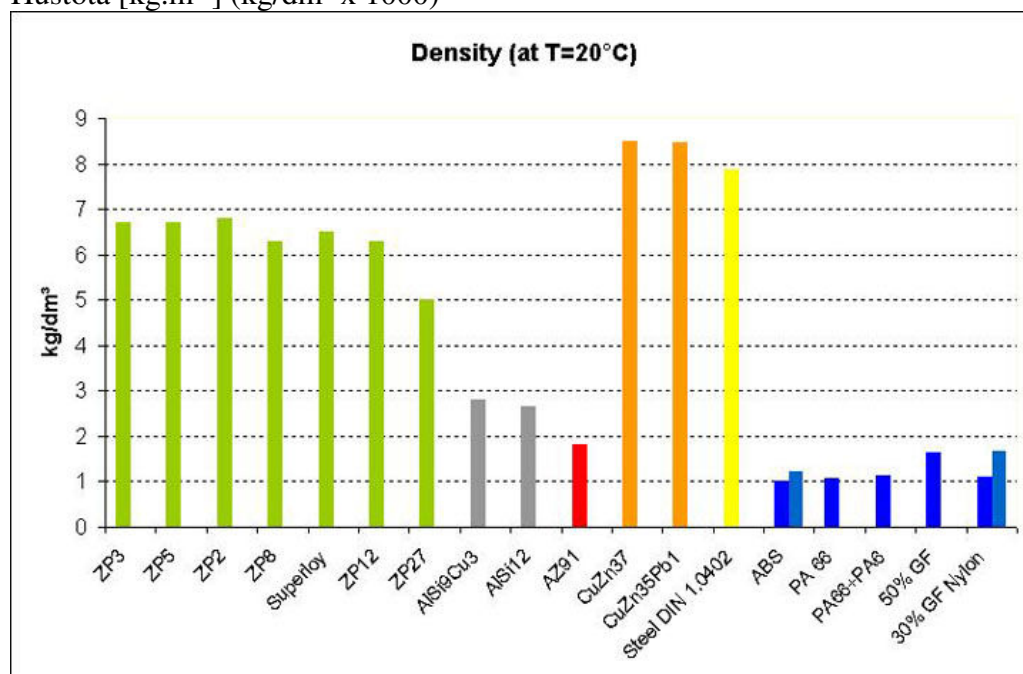
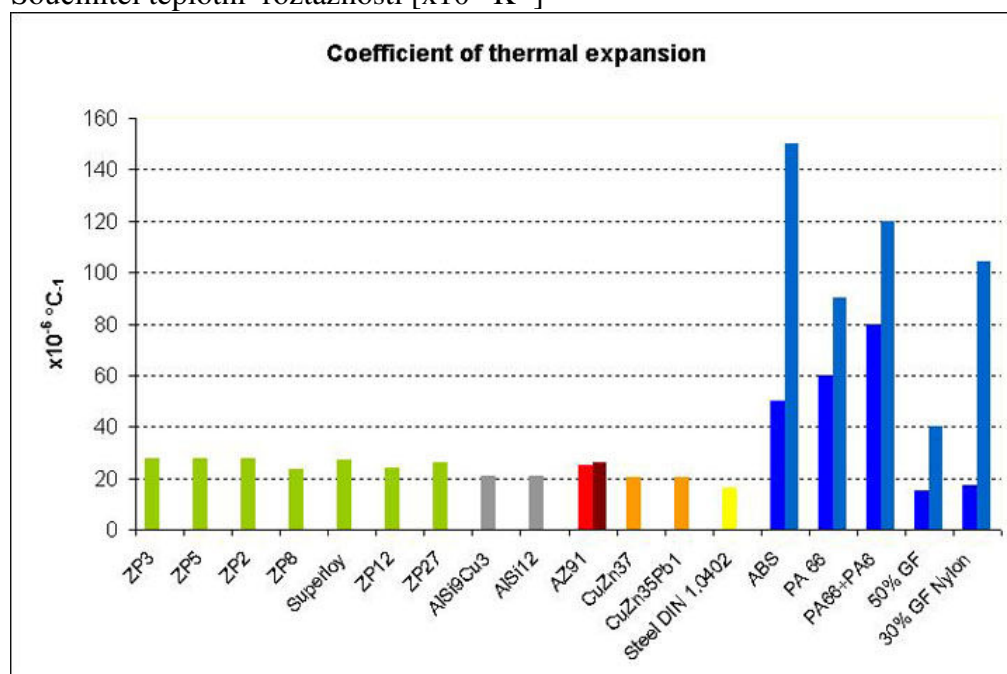
pokračování

Tlumičí schopnost materiálu [%]

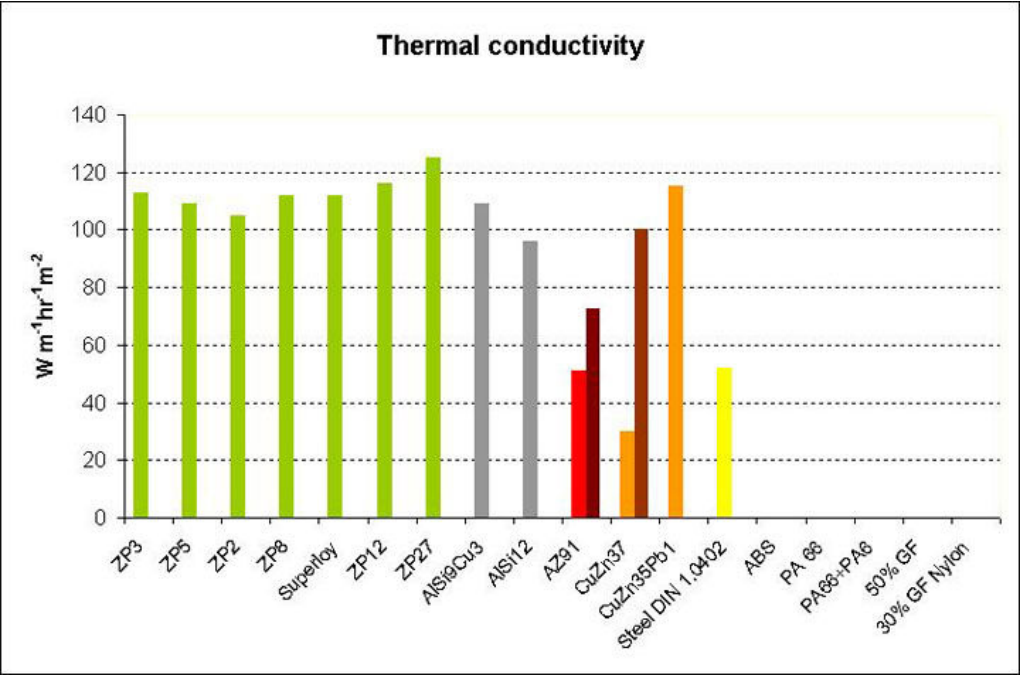


Tlumičí schopnost na 100 MPa [%]

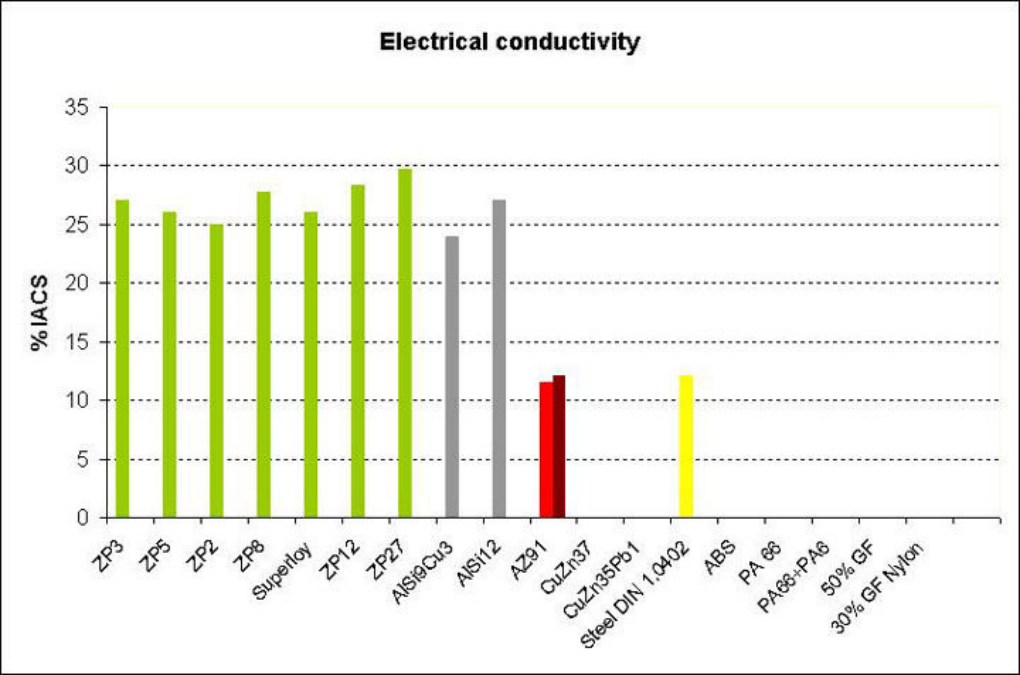


**Fyzikální vlastnosti vybraných materiálů [29]**Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] ( $\text{kg}/\text{dm}^3 \times 1000$ )Součinitel teplotní roztažnosti [ $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ]

Součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]



Elektrická vodivost [% IACS]

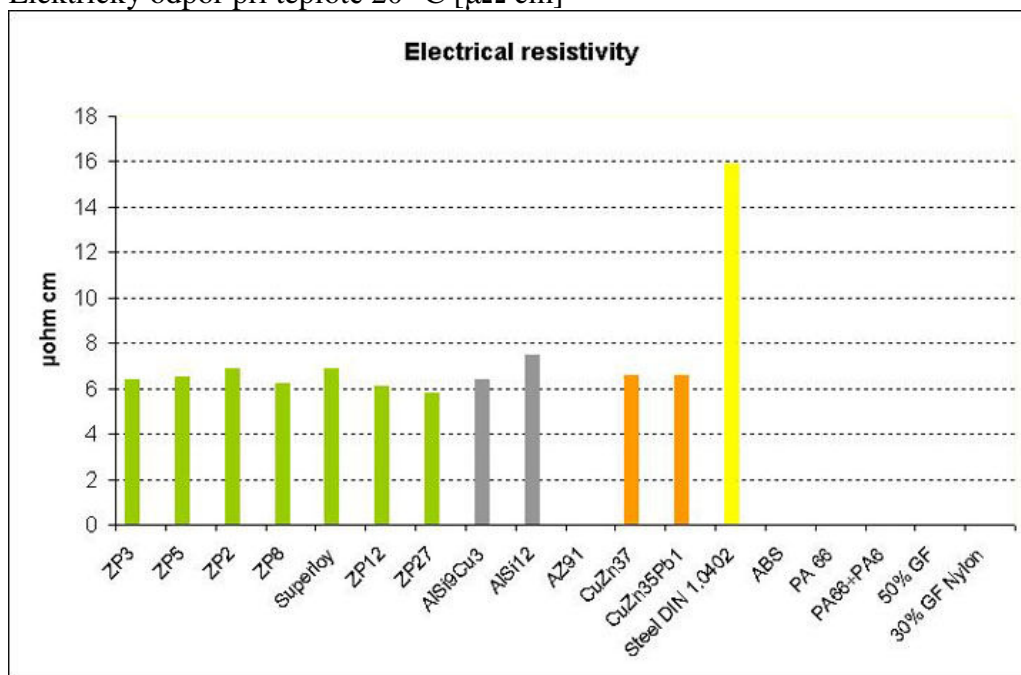




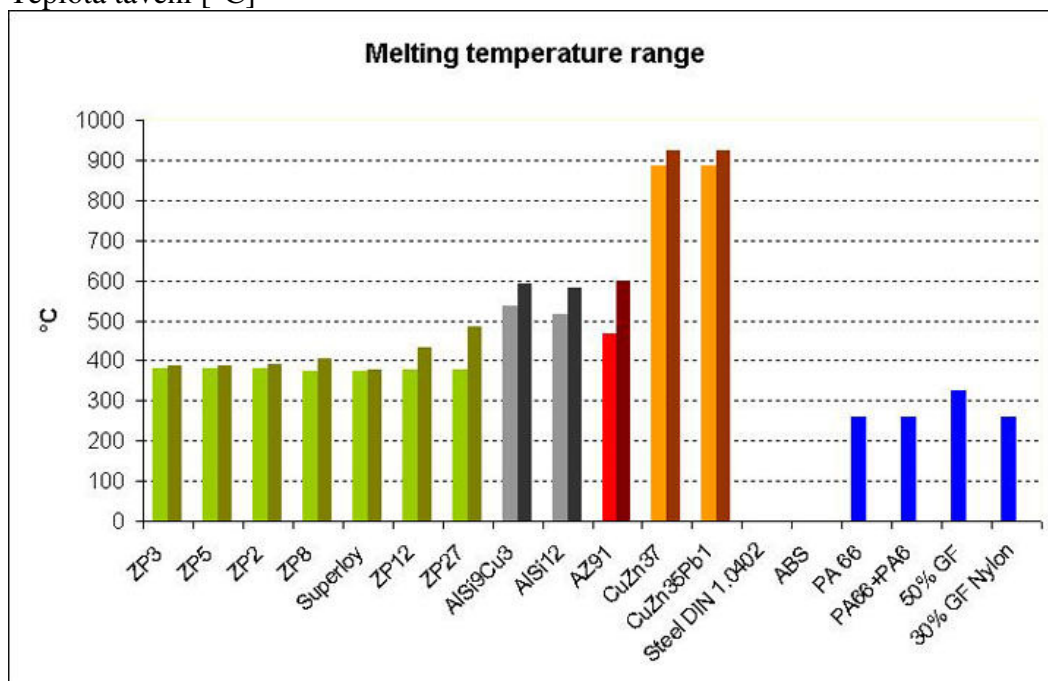
## Příloha č. 5

pokračování

Elektrický odpor při teplotě 20 °C [ $\mu\Omega$  cm]



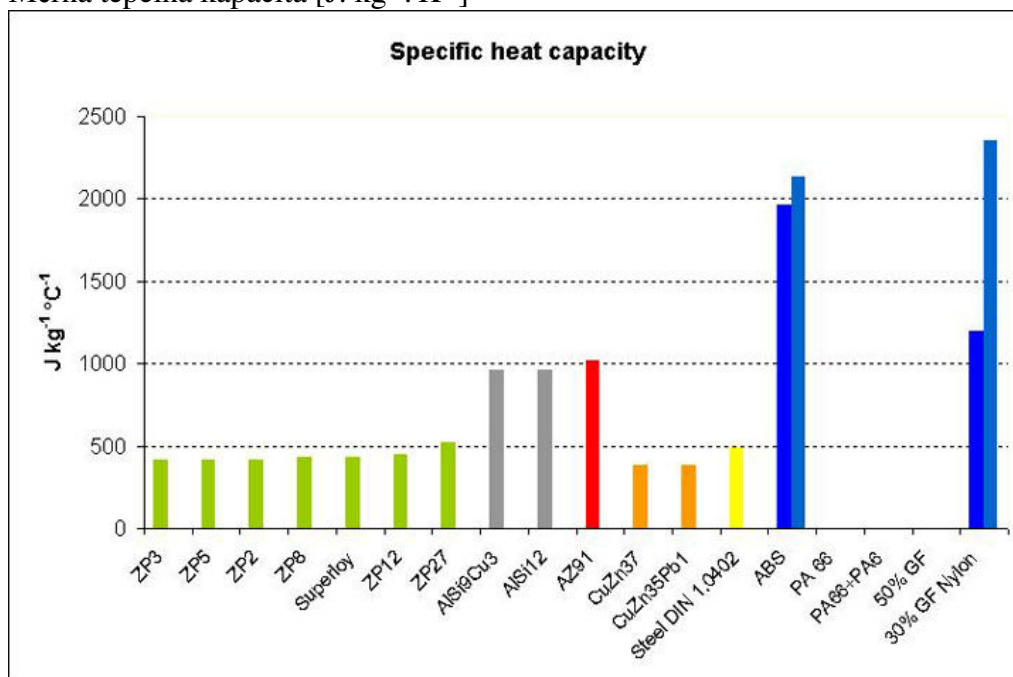
Teplota tavení [°C]



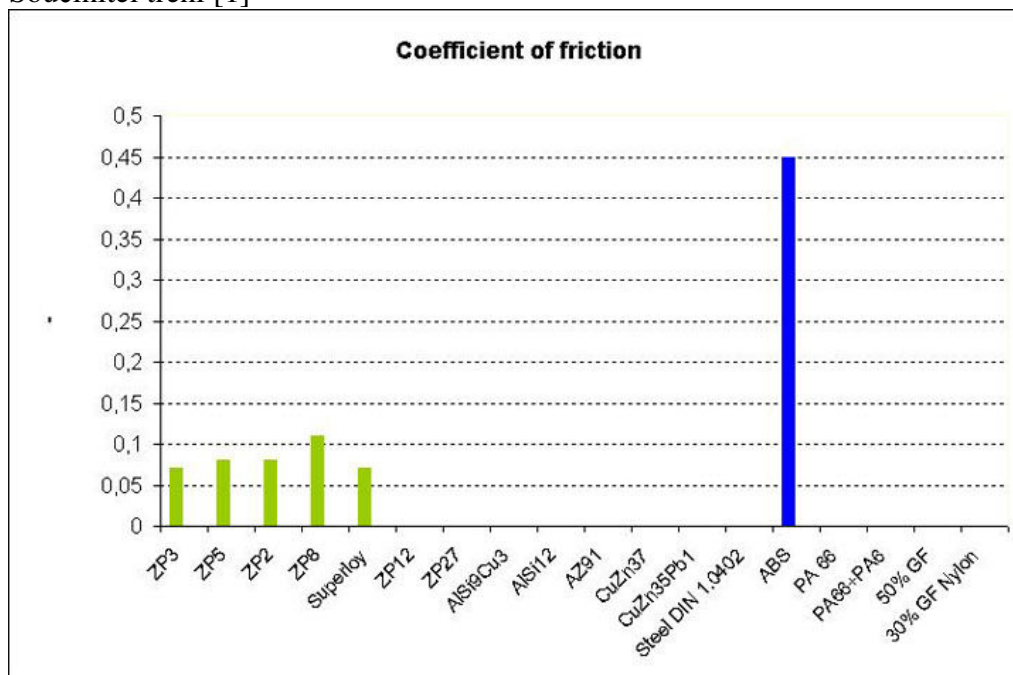
## Příloha č. 5

pokračování

Měrná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]



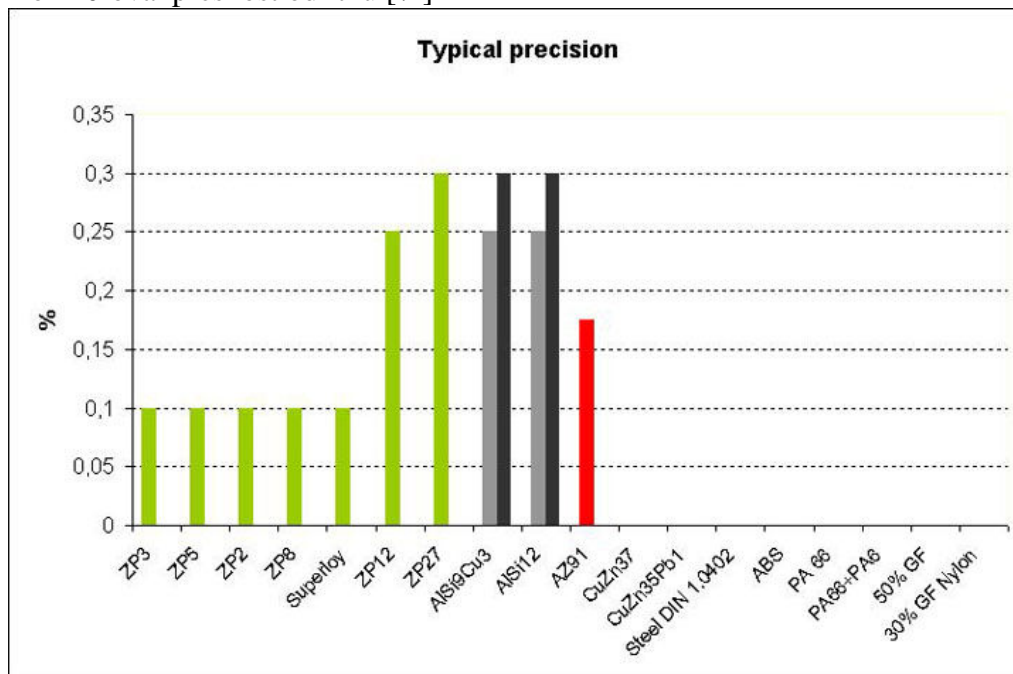
Součinitel tření [1]



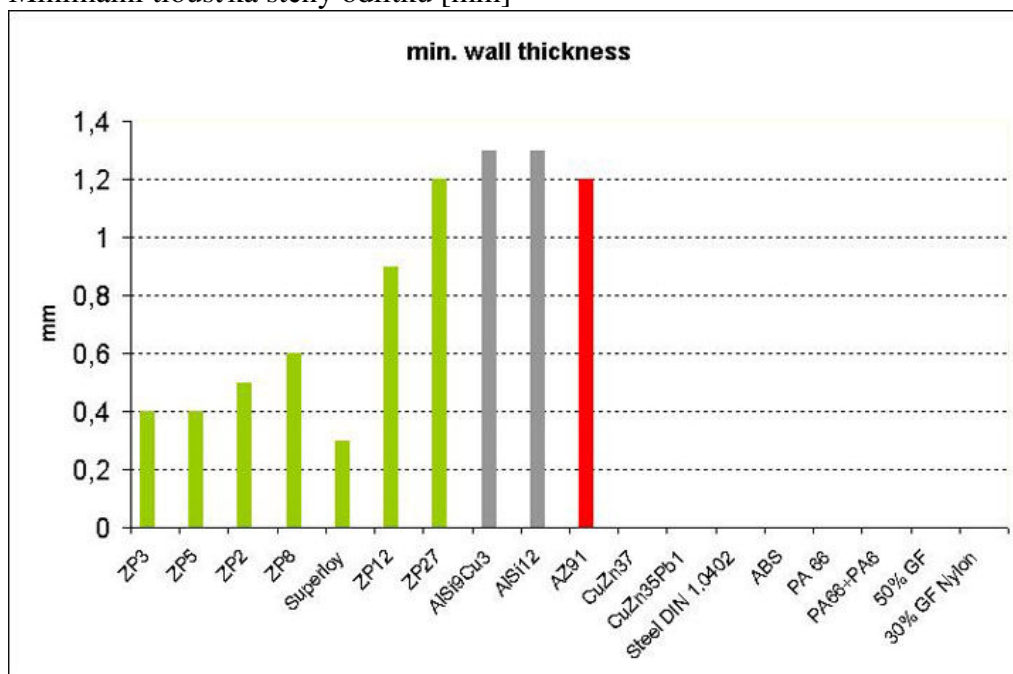


**Slévárenské vlastnosti vybraných materiálů [29]**

Rozměrová přesnost odlitku [%]



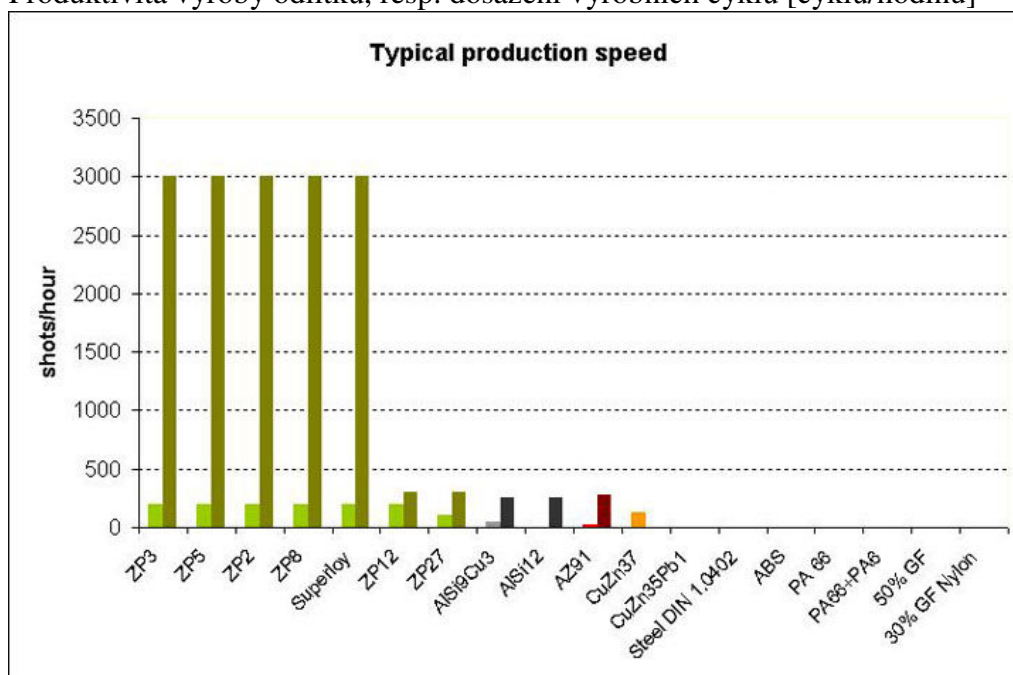
Minimální tloušťka stěny odlitku [mm]



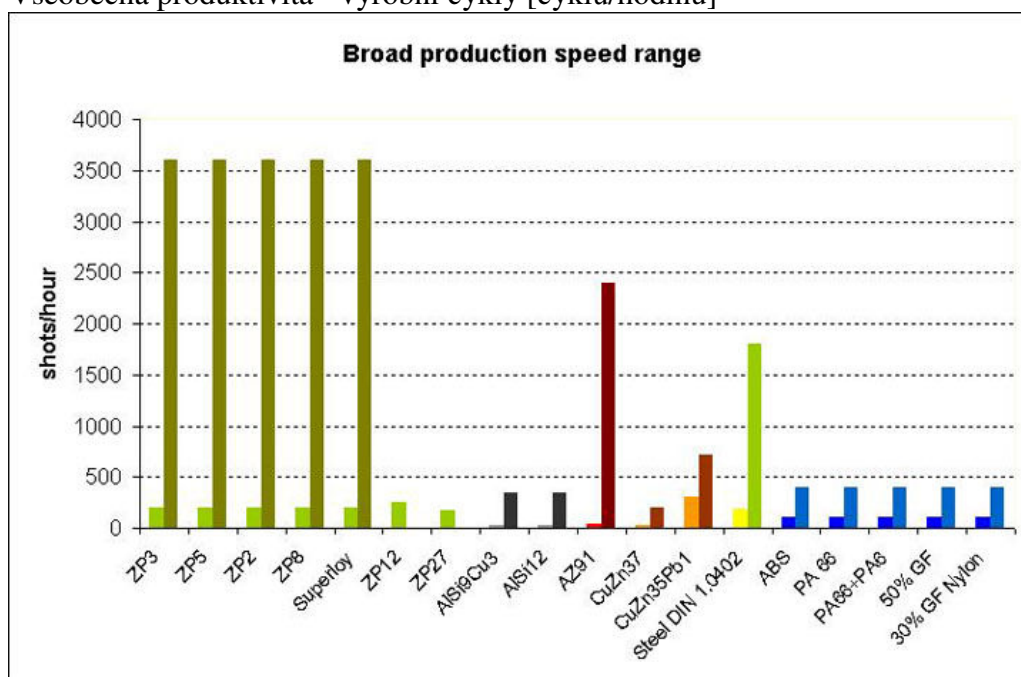
## Příloha č. 5

pokračování

Produktivita výroby odlitků, resp. dosažení výrobních cyklů [cyklů/hodinu]



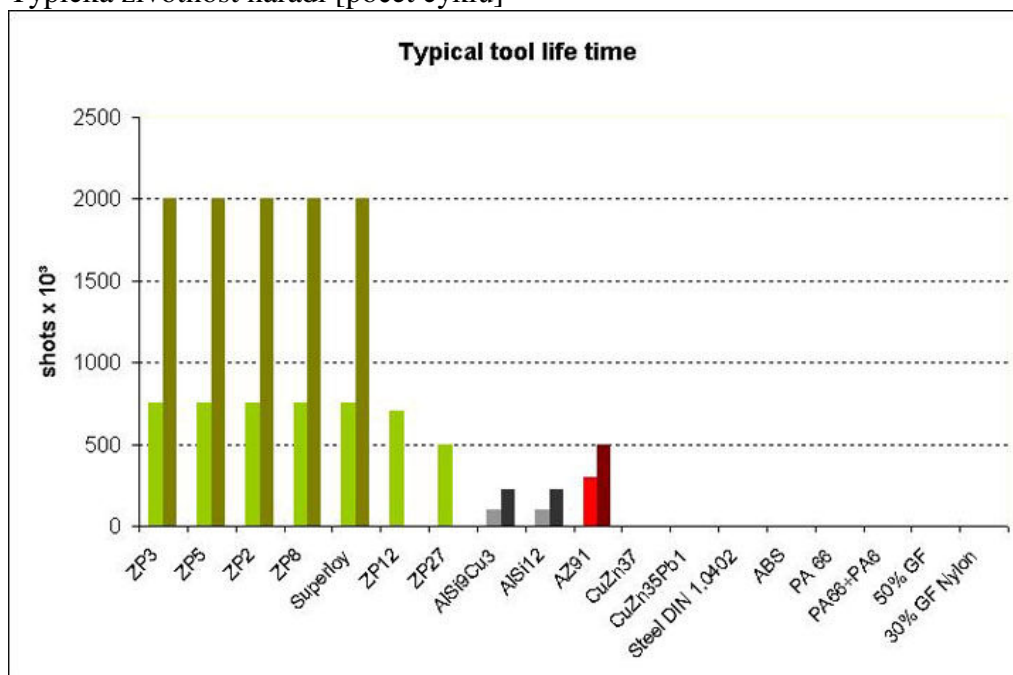
Všeobecná produktivita - výrobní cykly [cyklů/hodinu]



## Příloha č. 5

pokračování

Typická životnost náradí [počet cyklů]



### **Tlakové lití v porovnání s dalšími způsoby výroby strojních součástí [37]**

*Tlakové lití v porovnání s vstřikováním plastů* - tlakové lití produkuje odlitky s menšími tolerancemi rozměrů, vykazují větší pevnost a trvanlivost. Tlakově lité součásti mají větší odolnost vůči extrémní teplotě, vykazují vyšší hodnoty mechanických vlastností.

*Tlakové lití v porovnání s litím do pískových forem* - tlakové lití produkuje odlitky tenkostěnné s menší rozměrovou tolerancí a hladším povrchem. Výroba je rychlejší a mzdové náklady na odlévání jsou nižší. Dokončovací náklady jsou také menší. Jsou větší náklady na tlakové stroje a formy.

*Tlakové lití v porovnání s litím do trvalých kovových forem* - nízkotlaké lití nabízí do jisté míry stejné výhody v porovnání s litím do trvalých forem, odlitky jsou v obou případech hutné (bez vnitřní porózy). Vysokotlaké odlitky se vyznačují vyšší rozměrovou přesností, větší hladkostí povrchu, ale jsou více porézní. V obou případech jsou nutné stroje a kovové formy příslušné kvality.

*Tlakové lití v porovnání s kováním* - proces tlakového lití vyrábí mnohem složitější tvary s velmi nízkou tolerancí, tenkostěnné odlitky s minimálními nároky na dokončovací práci. V obou případech jsou nutná zařízení (tlakové stroje, lisové nebo buchary) a také výrobní nástroje (tlaková forma a zápustka). Kováním se dosahují vysoké hodnoty mechanických vlastností a slouží především pro zpracování ocelí (klikové hřídele, ojnice, polotovary pro výrobu ozubených kol, atd.). Kováním nelze vyrobít díl s dírou. Naopak tlakovým litím se vyrábí odlitky ze slitin hliníku a zinku.

*Tlakové lití v porovnání s produkty vyrobené automatizovanými linkami* - odlitky lité pod tlakem jsou tvarově členité s tenkými stěnami. Takové to výrobky jsou obtížné, resp. nemožné vyrobitelné z tyčí nebo jiných polotovarů při zachování tolerancí. Odlitky lité pod tlakem vyžadují méně operací, mají značnou využitelnost kovu, jejich obrábění je minimální. Naopak při obrábění se z materiálu odstraňují určité vrstvy a využitelnost kovu je podstatně menší (závisí na tvaru obráběného dílu).

**Výhody odlitků vyráběné tlakovým litím ze slitin zinku [37]**

1. Odlitky vykazují přesnou a úzké pásmo tolerance (rozměrová přesnost a schopnost) - referenční hodnota 1/1000 z nominální délky; speciálně elektronický průmysl vyžaduje přesnou toleranci rozměrů, lze vyrábět odlitky tenkostěnné s vyhovujícími mechanickými vlastnostmi;
2. Vysoká produktivita výroby odlitků, existují poloautomaty - výkonnost až 3600 odlití/hod. V důsledku speciálních fyzikálních vlastností a technologie tlakového lití se používají tlakové stroje s horkou komorou;
3. Získané odlitky jsou vhodné skoro pro všechny povrchové úpravy (dekorace, antikoroze ochrana nebo technické vlastnosti) - chromování, lakování, vodní nátěr, eketronátěr, obalování práškem a dokonce PVD (fyzikální pokovování parami) a CVD (chemické pokovování);
4. Mechanické vlastnosti odlitků jsou porovnatelné s ostatními odlitky neželezných kovů;
5. Žádné nebo málo potřebné dodatečné dokončovací operace. Jedná se o odstranění nebo redukci drahých pomocných operací jako je ořez a obrábění.
6. Tlakové formy pro odlévání slitin zinku vykazují poměrně vysokou životnost – lze provést až 1 000 000 odlití než dojde k opotřebení formy. Ve srovnání s jinými tlakově litými slitinami (např. slitiny Al), kde formy vydrží, dle složitosti odlitku, cca 120 000 odlití.
7. Tlakově lité odlitky ze slitin zinku vykazují minimální náklady na obrábění - eliminace velkých jednoduchých nebo vícenásobných dutin může snížit náklady na obrábění více než 60 %.
8. Lze vyrábět drobné odlitky značně tvarově složité;
9. Odlitky se vyznačují vynikajícími antikorozními vlastnostmi;
10. Na odlitcích lze vytvářet vynikající ochranu EMI (elektro-magnetickou interferenci), která je důležitou ochranou odlitků především slitin typu ZAMAK, které jsou používány v obytných interiérech;
11. Slitiny zinku jsou plně recyklovatelné;

## Příloha č. 7

Tabulka termodynamických hodnot čistého zinku pro stav pevný (s) a kapalný (l)

[44]

Prvek, slouče -nina	Atomová, molekul. hmotnost	Tání		Konstanty pro tepelnou kapacitu $C_p = a + bT + cT^{-2}$ [J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] a slučovací entalpii $H_T - H_{298} = a.T + (b/2).T^2 - c.T^{-1} + d$ [J.mol <sup>-1</sup> ]					Slučovací entalpie ( $\Delta H^0_{298}$ ) <sub>sl</sub> [J.mol <sup>-1</sup> ]	Slučovací entropie $S^0_{298}$ [J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
				a	10 <sup>3</sup> .b	10 <sup>-5</sup> .c	d	Rozsah teplot [K]		
Zn (s)	65,37	419,5	6 676	22,40	10,06	-	-7 127	298 – 692,5	-	41,65
Zn (l)	-	-	-	31,43	-	-	-4 280	692,5 – 1200	-	-

Poznámka: pro hodnoty konstant v této tabulce platí např. 10,06 = b.10<sup>3</sup> z toho plyne, že b = 10,06.10<sup>-3</sup>

## Příloha č. 8

### Tepelné a fyzikální vlastnosti čistého zinku [25]

Vlastnost	Hodnota
Teplota tání $T_{\text{tání}} [^{\circ}\text{C}]$	419,5
Hustota (kapalný stav) $\rho_{\text{(L)}} [\text{kg.m}^{-3}]$	6570
Hustota (tuhý stav) $\rho_{\text{(S)}} [\text{kg.m}^{-3}]$	7140
Měrná tepelná kapacita pro kapalný stav $c_{\text{L}} [\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	502
Měrná tepelná kapacita pro tuhý stav $c_{\text{S}} [\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	385
Latentní krystalizační teplo $L_{\text{KR}} [\text{J.kg}^{-1}]$	112 923

### Tepelné a fyzikální vlastnosti slitin zinku [13]

Fyzikální vlastnost	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
Teplota likvidu $T_{\text{L}} [^{\circ}\text{C}]$	387	386	390
Teplota solidu $T_{\text{S}} [^{\circ}\text{C}]$	382	382	382
Hustota (stav kapalný) $\rho_{\text{(L)}} [\text{kg.m}^{-3}]$	6660	6750	6760
Měrná tepelná kapacita v kapalném stavu $c_{\text{L}} [\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	436	450	455
Měrná tepelná kapacita v pevném stavu $c_{\text{S}} [\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	389	395	420
Latentní krystalizační teplo $L_{\text{KR}} [\text{J.kg}^{-1}]$	110 000	110 050	110 100

### Tepelné hodnoty slévarenských materiálů z neželezných kovů [47]

Materiál	Krystalizační teplo $[\text{J.kg}^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita $[\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	
		$c_{\text{L}}$	$c_{\text{S}}$
Čistý hliník 99,98 %	397 163	1289,5	896,0
Slitina AlSi10	472 121	1070,0	968,0
Slitina AlSi9Cu3	463 100	1090,0	985,0
Slitina AlSi12	513 335	1131,0	1080,0
Čisté olovo	23 865	142,0	129,0
Čistá měď	209 340	480,0	383,0
Mosaz (40 % Zn)	180 032	447,0	381,0
Čistý cín	56 615	227,0	243,0
ZnAl4	110 000	436	389
ZnAl4Cu1	110 050	450	395
ZnAl4Cu3	110 100	455	420

**Odlitky spirál získané při zkoumaných teplotách**

Teplota lití 420 °C



čistý zinek



ZnAl4



ZnAl4Cu1

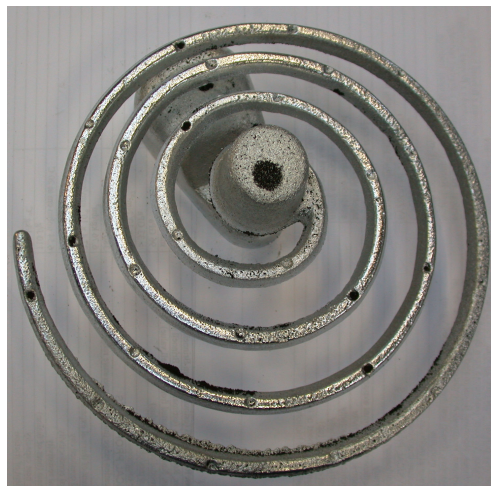


ZnAl4Cu3

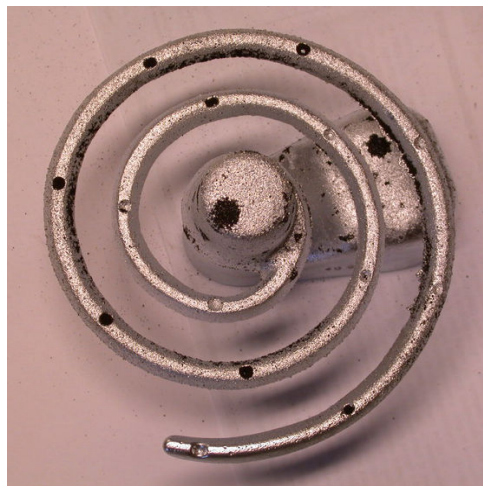


**Příloha č. 9**  
**pokračování**

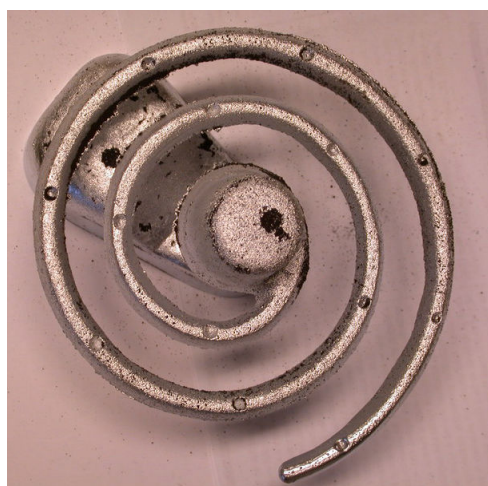
Teplota lití 450 °C



čistý zinek



ZnAl4



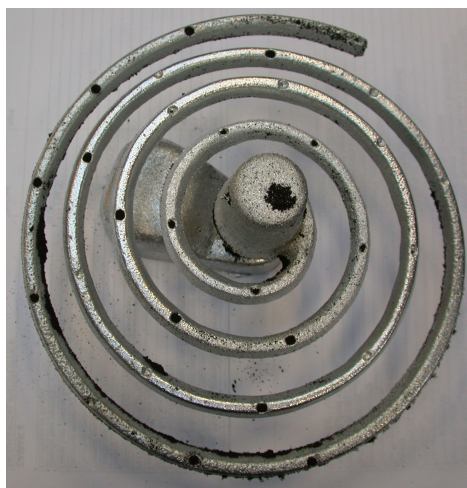
ZnAl4Cu1



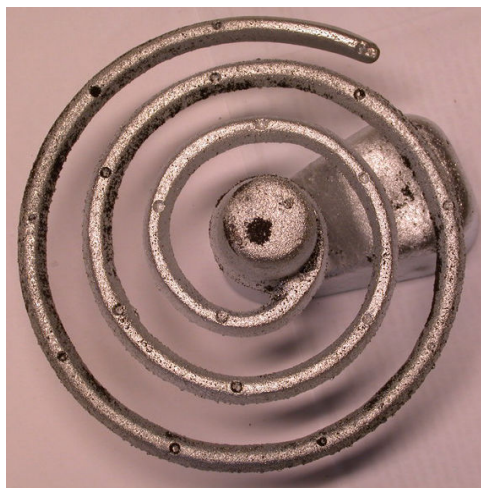
ZnAl4Cu3

**Příloha č. 9**  
**pokračování**

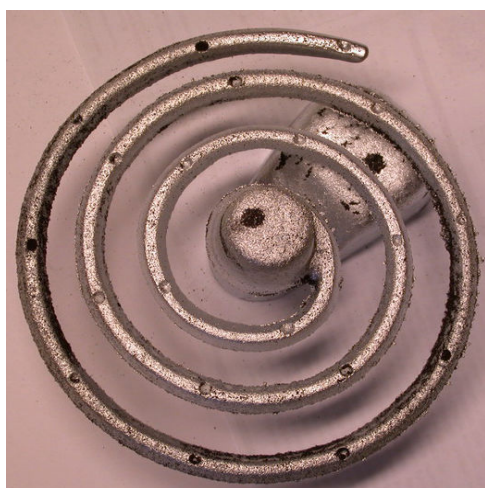
Teplota lití 480 °C



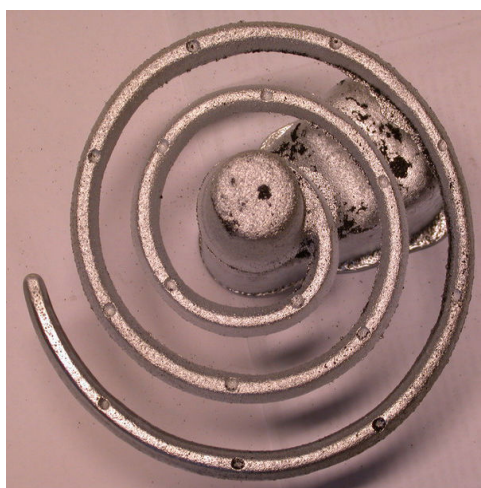
čistý zinek



ZnAl4



ZnAl4Cu1



ZnAl4Cu3



**Příloha č. 9**  
**pokračování**

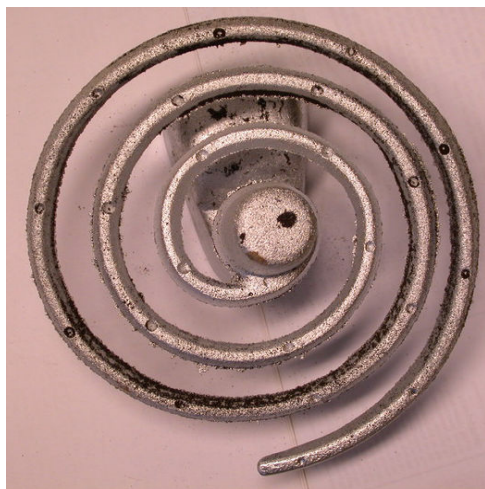
Teplota lití 510 °C



čistý zinek



ZnAl4



ZnAl4Cu1



ZnAl4Cu3

**Příloha č. 9**  
**pokračování**

Teplota lití 550 °C



čistý zinek



ZnAl4



ZnAl4Cu1



ZnAl4Cu3

## Příloha č. 10

**Tabulka 5.1 Hodnoty zabíhavosti čistého zinku a slitin zinku při teplotě odlévání  
420 °C**

Číslo měření	Zabíhavost [m] při teplotě odlévání 420 °C			
	čistý zinek	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAlCu3
1.	1,105	0,534	0,421	0,357
2.	1,104	0,540	0,423	0,359
3.	1,107	0,539	0,420	0,358
4.	1,103	0,541	0,422	0,360
5.	1,100	0,538	0,419	0,356
6.	1,101	0,542	0,420	0,361
7.	1,103	0,536	0,418	0,358
Střední hodnota	1,103	0,539	0,420	0,358
Směrodatná odchylka	0,00236	0,00282	0,00159	0,00159
Rozptyl	$5,571 \cdot 10^{-6}$	$7,952 \cdot 10^{-6}$	$2,952 \cdot 10^{-6}$	$2,952 \cdot 10^{-6}$
Variační koeficient	0,0021	0,0052	0,0038	0,0044

**Tabulka 5.2 Hodnoty zabíhavosti čistého zinku a slitin zinku při teplotě odlévání  
450 °C**

Číslo měření	Zabíhavost [m] při teplotě odlévání 450 °C			
	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAlCu3
1.	1,426	0,744	0,670	0,630
2.	1,428	0,740	0,676	0,633
3.	1,421	0,742	0,672	0,636
4.	1,424	0,741	0,674	0,632
5.	1,425	0,742	0,671	0,629
6.	1,427	0,745	0,673	0,634
7.	1,425	0,743	0,669	0,635
Střední hodnota	1,425	0,742	0,672	0,633
Směrodatná odchylka	0,00227	0,00172	0,00241	0,00256
Rozptyl	$5,143 \cdot 10^{-6}$	$2,952 \cdot 10^{-6}$	$5,809 \cdot 10^{-6}$	$6,571 \cdot 10^{-6}$
Variační koeficient	0,0015	0,0023	0,0049	0,0045

**Tabulka 5.3** Hodnoty zabíhavosti čistého zinku a slitin zinku při teplotě odlévání  
480 °C

Číslo měření	Zabíhavost [m] při teplotě odlévání 480 °C			
	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAlCu3
1.	1,491	1,044	0,961	0,847
2.	1,495	1,048	0,958	0,846
3.	1,493	1,045	0,96	0,85
4.	1,496	1,049	0,959	0,844
5.	1,492	1,045	0,959	0,849
6.	1,494	1,047	0,962	0,848
7.	1,493	1,046	0,963	0,847
Střední hodnota	1,493	1,046	0,960	0,847
Směrodatná odchylka	0,00172	0,0018	0,0018	0,00198
Rozptyl	$2,9522 \cdot 10^{-6}$	$3,238 \cdot 10^{-6}$	$3,238 \cdot 10^{-6}$	$3,905 \cdot 10^{-6}$
Variační koeficient	0,0012	0,004	0,0019	0,0035

**Tabulka 5.4** Hodnoty zabíhavosti čistého zinku a slitin zinku při teplotě odlévání  
510 °C

Číslo měření	Zabíhavost [m] při teplotě odlévání 510 °C			
	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAlCu3
1.	1,571	1,170	1,115	1,065
2.	1,568	1,169	1,112	1,066
3.	1,574	1,172	1,113	1,062
4.	1,572	1,174	1,109	1,061
5.	1,573	1,173	1,114	1,064
6.	1,571	1,171	1,116	1,068
7.	1,569	1,176	1,111	1,063
Střední hodnota	1,571	1,172	1,113	1,064
Směrodatná odchylka	0,00212	0,00241	0,00241	0,00241
Rozptyl	$4,476 \cdot 10^{-6}$	$5,809 \cdot 10^{-6}$	$5,809 \cdot 10^{-6}$	$5,809 \cdot 10^{-6}$
Variační koeficient	0,0013	0,0045	0,0022	0,003

**Tabulka 5.5 Hodnoty zabíhavosti čistého zinku a slitin zinku při teplotě odlévání  
550 °C**

Číslo měření	Zabíhavost [m] při teplotě odlévání 550 °C			
	Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAlCu3
<b>1.</b>	1,58	1,326	1,295	1,274
<b>2.</b>	1,583	1,323	1,29	1,269
<b>3.</b>	1,581	1,330	1,287	1,273
<b>4.</b>	1,579	1,327	1,286	1,268
<b>5.</b>	1,579	1,329	1,294	1,272
<b>6.</b>	1,582	1,328	1,291	1,27
<b>7.</b>	1,578	1,324	1,289	1,275
Střední hodnota	1,58	1,327	1,29	1,272
Směrodatná odchylka	0,0018	0,00256	0,00335	0,00264
Rozptyl	$3,238 \cdot 10^{-6}$	$6,571 \cdot 10^{-6}$	$11,238 \cdot 10^{-6}$	$6,952 \cdot 10^{-6}$
Variační koeficient	0,0011	0,0016	0,003	0,0026

**Vztahy používané při statistickém vyhodnocení naměřených dat**

a) střední hodnota sledované veličiny:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ,$$

kde značí:    n - počet měření (n = 7) [1];

                  i - pořadové číslo měření, sledované veličiny [1];

                  x<sub>i</sub> - naměřenou hodnotu sledované veličiny při i-tém měření.

b) směrodatná odchylka sledované veličiny:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} ,$$

c) rozptyl sledované veličiny:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

d) variační koeficient sledované veličiny:

$$v = \frac{s}{\bar{x}} .$$



## Příloha č. 12

Hodnoty konstanty tuhnutí  $k$  pro různé materiály odlévané do příslušné formy [42]

Odlévaný materiál	Slévárenská forma	Konstanta tuhnutí $k$ [ $\text{m.s}^{-1/2}$ ]
Zinek	kovová	0,00348
Hliník	kovová	0,00366
Mosaz	kovová	0,0162
Mosaz	písková	0,00216
Litina s lupínkovým grafitem	kovová	0,00282
Litina s lupínkovým grafitem	písková	0,00066
Ocel na odlitky	kovová z litiny	0,00336
Ocel na odlitky	písková	0,00102

**Příloha č. 13**

**Tabulka 5.A Naměřené hodnoty velikosti ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce z čistého zinku v ocelové formě,  $T_F = 20\text{ °C}$**

<b>Zinek</b>				
<b>Kovová forma s dutinou Ø 60x70 mm, teplota lití 550 °C</b>				
<b>Číslo měření</b>	<b>Počáteční teplota formy [°C]</b>	<b>Čas tuhnutí odlitku [s]</b>	<b>Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce [mm]</b>	
<b>1.</b>	20	0	Naměřené hodnoty	0; 0; 0; 0; 0; 0; 0
			Střední hodnota	0
			Směrodatná odchylka	0
			Rozptyl	0
			Variační koeficient	0
<b>2</b>	20	15	Naměřené hodnoty	2,8; 3,4; 3,1; 2,9; 3; 3,5; 2,7
			Střední hodnota	3,0
			Směrodatná odchylka	0,412
			Rozptyl	0,17
			Variační koeficient	0,139
<b>3.</b>	20	30	Naměřené hodnoty	11; 12,1; 9,2; 8,8; 10; 9,3; 13
			Střední hodnota	10,50
			Směrodatná odchylka	1,598
			Rozptyl	2,55
			Variační koeficient	0,152
<b>4.</b>	20	45	Naměřené hodnoty	17,3; 17,8; 21,6; 17,2; 20,3; 18,6; 19,4
			Střední hodnota	18,9
			Směrodatná odchylka	1,646
			Rozptyl	2,708
			Variační koeficient	0,087
<b>5.</b>	20	50	Naměřené hodnoty	22,3; 21,8; 22,9; 23,1; 23,6; 22,7; 23,2
			Střední hodnota	22,80
			Směrodatná odchylka	0,6
			Rozptyl	0,36
			Variační koeficient	0,026
<b>6.</b>	20	55	Naměřené hodnoty	27,2; 27,8; 28,1; 27,6; 28; 27,3; 26,9
			Střední hodnota	27,50
			Směrodatná odchylka	0,443
			Rozptyl	0,196
			Variační koeficient	0,016

**Poznámka:** Tloušťku ztuhlé vrstvy při tuhnutí odlitku tvaru válce lze přepočítat na tloušťku ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru desky:  $\xi_D = \xi_V (1 - \xi_V/60)$

# Příloha č. 13

pokračování

**Tabulka 5.B Naměřené hodnoty velikosti ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce ze slitiny ZnAl4 v ocelové formě,  $T_F = 20\text{ °C}$**

<b>ZnAl4</b> <b>Kovová forma s dutinou Ø 60x70 mm, teplota lití 550 °C</b>				
Číslo měření	Počáteční teplota formy [°C]	Čas tuhnutí odlitku [s]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce [mm]	
1.	20	0	Naměřené hodnoty	0; 0; 0; 0; 0; 0; 0
			Střední hodnota	0
			Směrodatná odchylka	0
			Rozptyl	0
			Variační koeficient	0
2	20	15	Naměřené hodnoty	3,8; 3,4; 3,3; 3,3; 3,7; 3,4; 3,5
			Střední hodnota	3,49
			Směrodatná odchylka	0,195
			Rozptyl	0,038
			Variační koeficient	0,056
3.	20	30	Naměřené hodnoty	13,2; 10,3; 9,2; 12,3; 12,8; 11,4; 9,7
			Střední hodnota	11,27
			Směrodatná odchylka	1,572
			Rozptyl	2,472
			Variační koeficient	0,14
4.	20	45	Naměřené hodnoty	17,3; 17,8; 21,6; 17,2; 20,3; 18,6; 19,4
			Střední hodnota	19,61
			Směrodatná odchylka	0,932
			Rozptyl	0,868
			Variační koeficient	0,048
5.	20	50	Naměřené hodnoty	23,8; 23,4; 23,9; 24,1; 23,5; 24,2; 23,7
			Střední hodnota	23,79
			Směrodatná odchylka	0,294
			Rozptyl	0,087
			Variační koeficient	0,012
6.	20	55	Naměřené hodnoty	28,2; 27,9; 28; 28,9; 28,6; 28,2; 27,8
			Střední hodnota	28,12
			Směrodatná odchylka	0,395
			Rozptyl	0,156
			Variační koeficient	0,018

**Poznámka:** Tloušťku ztuhlé vrstvy při tuhnutí odlitku tvaru válce lze přepočítat na tloušťku ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru desky:  $\xi_D = \xi_V (1 - \xi_V/60)$

# Příloha č. 13

pokračování

**Tabulka 5.C Naměřené hodnoty velikosti ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce ze slitiny ZnAl4Cu1 v ocelové formě,  $T_F = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$**

<b>ZnAl4Cu1</b>				
<b>Kovová forma s dutinou Ø 60x70 mm, teplota lití 550 °C</b>				
<b>Číslo měření</b>	<b>Počáteční teplota formy [°C]</b>	<b>Čas tuhnutí odlitku [s]</b>	<b>Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce [mm]</b>	
<b>1.</b>	<b>20</b>	<b>0</b>	Naměřené hodnoty	0; 0; 0; 0; 0; 0; 0
			Střední hodnota	0
			Směrodatná odchylka	0
			Rozptyl	0
			Variační koeficient	0
<b>2</b>	<b>20</b>	<b>15</b>	Naměřené hodnoty	3,6; 4,4; 3,4; 3,5; 4,3; 4,4; 3,9
			Střední hodnota	3,93
			Směrodatná odchylka	0,439
			Rozptyl	0,192
			Variační koeficient	0,112
<b>3.</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	Naměřené hodnoty	18,7; 13,1; 11,1; 13,7; 14,2; 15; 14,2
			Střední hodnota	14,33
			Směrodatná odchylka	2,307
			Rozptyl	5,322
			Variační koeficient	0,161
<b>4.</b>	<b>20</b>	<b>45</b>	Naměřené hodnoty	17,5; 15,4; 18,3; 16,4; 18; 17,8; 17,3
			Střední hodnota	22,45
			Směrodatná odchylka	1,015
			Rozptyl	1,03
			Variační koeficient	0,059
<b>5.</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	Naměřené hodnoty	24,8; 24,1; 25; 24,7; 25,1; 24,9; 24,7
			Střední hodnota	24,77
			Směrodatná odchylka	0,326
			Rozptyl	0,106
			Variační koeficient	0,013
<b>6.</b>	<b>20</b>	<b>55</b>	Naměřené hodnoty	28,9; 29,1; 28,7; 28,8; 29; 28,8; 29,2
			Střední hodnota	28,99
			Směrodatná odchylka	0,18
			Rozptyl	0,032
			Variační koeficient	0,006

**Poznámka:** Tloušťku ztuhlé vrstvy při tuhnutí odlitku tvaru válce lze přepočítat na tloušťku ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru desky:  $\xi_D = \xi_V (1 - \xi_V/60)$

**Příloha č. 13**

pokračování

**Tabulka 5.D Naměřené hodnoty velikosti ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce ze slitiny zinku ZnAl4Cu3 v ocelové formě,  $T_F = 20\text{ °C}$**

<b>Slitina ZnAl4Cu3</b>				
<b>Kovová forma s dutinou Ø 60x70 mm, teplota liti 550 °C</b>				
<b>Číslo měření</b>	<b>Počáteční teplota formy [°C]</b>	<b>Čas tuhnutí odlitku [s]</b>	<b>Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce [mm]</b>	
<b>1.</b>	20	0	Naměřené hodnoty	0; 0; 0; 0; 0; 0; 0
			Střední hodnota	0
			Směrodatná odchylka	0
			Rozptyl	0
			Variační koeficient	0
<b>2</b>	20	15	Naměřené hodnoty	5; 5,5; 5,5; 5,4; 5,6; 5,2; 5,1
			Střední hodnota	5,33
			Směrodatná odchylka	0,229
			Rozptyl	0,052
			Variační koeficient	0,043
<b>3.</b>	20	30	Naměřené hodnoty	18,3; 16; 17,8; 16; 18,8; 16,9; 17,4
			Střední hodnota	15,9
			Směrodatná odchylka	1,084
			Rozptyl	1,175
			Variační koeficient	0,063
<b>4.</b>	20	45	Naměřené hodnoty	27,2; 25,3; 26,4; 27; 25,8; 26,1; 25,3
			Střední hodnota	24
			Směrodatná odchylka	0,759
			Rozptyl	0,576
			Variační koeficient	0,029
<b>5.</b>	20	50	Naměřené hodnoty	26,8; 26,5; 27,1; 26,9; 27; 26,8; 26,7
			Střední hodnota	26,8
			Směrodatná odchylka	0,198
			Rozptyl	0,039
			Variační koeficient	0,007
<b>6.</b>	20	55	Naměřené hodnoty	29,9; 29,6; 29,8; 29,9; 29,8; 30; 29,9
			Střední hodnota	29,87
			Směrodatná odchylka	0,127
			Rozptyl	0,016
			Variační koeficient	0,004

**Poznámka:** Tloušťku ztuhlé vrstvy při tuhnutí odlitku tvaru válce lze přepočítat na tloušťku ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru desky:  $\xi_D = \xi_V (1 - \xi_V/60)$

**Příloha č. 13**

**pokračování**

**Tabulka 5.E Naměřené hodnoty velikosti ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce z čistého zinku v ocelové formě,  $T_F = 200\text{ °C}$**

<b>Zinek</b>				
<b>Kovová forma s dutinou Ø 60x70 mm, teplota lití 550 °C</b>				
<b>Číslo měření</b>	<b>Počáteční teplota formy [°C]</b>	<b>Čas tuhnutí odlitku [s]</b>	<b>Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce [mm]</b>	
<b>1.</b>	200	0	Naměřené hodnoty	0; 0; 0; 0; 0; 0; 0
			Střední hodnota	0
			Směrodatná odchylka	0
			Rozptyl	0
			Variační koeficient	0
<b>2</b>	200	15	Naměřené hodnoty	2,5; 3; 2,4; 2,8; 3,2; 3,5; 3,3
			Střední hodnota	3,06
			Směrodatná odchylka	0,299
			Rozptyl	0,09
			Variační koeficient	0,098
<b>3.</b>	200	30	Naměřené hodnoty	5,8; 6,2; 6,3; 6; 4; 4,4; 5
			Střední hodnota	5,39
			Směrodatná odchylka	0,921
			Rozptyl	0,848
			Variační koeficient	0,171
<b>4.</b>	200	45	Naměřené hodnoty	13,6; 13; 12; 13,1; 13,7; 12,8; 12,9
			Střední hodnota	13,01
			Směrodatná odchylka	0,564
			Rozptyl	0,318
			Variační koeficient	0,048
<b>5.</b>	200	50	Naměřené hodnoty	16,9; 17,2; 16,4; 16,7; 17,6; 16,2; 16,8
			Střední hodnota	16,84
			Směrodatná odchylka	0,472
			Rozptyl	0,222
			Variační koeficient	0,028
<b>6.</b>	200	55	Naměřené hodnoty	18,2; 18,8; 17,9; 17,5; 17,8; 18,1; 17,7
			Střední hodnota	18,01
			Směrodatná odchylka	0,424
			Rozptyl	0,18
			Variační koeficient	0,024

**Poznámka:** Tloušťku ztuhlé vrstvy při tuhnutí odlitku tvaru válce lze přepočítat na tloušťku ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru desky:  $\xi_D = \xi_V (1 - \xi_V/60)$

**Tabulka 5.F Naměřené hodnoty velikosti ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce ze slitiny zinku ZnAl4 v ocelové formě,  $T_F = 200\text{ °C}$**

<b>Slitina ZnAl4</b> <b>Kovová forma s dutinou Ø 60x70 mm, teplota lití 550 °C</b>				
Číslo měření	Počáteční teplota formy [°C]	Čas tuhnutí odlitku [s]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce [mm]	
1.	200	0	Naměřené hodnoty	0; 0; 0; 0; 0; 0; 0
			Střední hodnota	0
			Směrodatná odchylka	0
			Rozptyl	0
			Variační koeficient	0
2	200	15	Naměřené hodnoty	3,2; 3,2; 2,9; 3,2; 2,9; 3,2; 2,8
			Střední hodnota	3,66
			Směrodatná odchylka	0,181
			Rozptyl	0,033
			Variační koeficient	0,059
3.	200	30	Naměřené hodnoty	5,4; 5,7; 5,5; 4,9; 5,8; 5,5; 5,8
			Střední hodnota	5,51
			Směrodatná odchylka	0,313
			Rozptyl	0,098
			Variační koeficient	0,057
4.	200	45	Naměřené hodnoty	14,2; 13,5; 12,3; 14,3; 12,8; 13,6; 12,7
			Střední hodnota	13,34
			Směrodatná odchylka	0,768
			Rozptyl	0,59
			Variační koeficient	0,058
5.	200	50	Naměřené hodnoty	17,3; 17,9; 18,1; 17,2; 16,9; 18,3; 16,8
			Střední hodnota	17,46
			Směrodatná odchylka	0,597
			Rozptyl	0,357
			Variační koeficient	0,034
6.	200	55	Naměřené hodnoty	18,9; 19,2; 18,6; 19; 18,4; 18,8; 19,4
			Střední hodnota	18,97
			Směrodatná odchylka	0,342
			Rozptyl	0,117
			Variační koeficient	0,018

**Poznámka:** Tloušťku ztuhlé vrstvy při tuhnutí odlitku tvaru válce lze přepočítat na tloušťku ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru desky:  $\xi_D = \xi_V (1 - \xi_V/60)$

**Příloha č. 13**

**pokračování**

**Tabulka 5.G Naměřené hodnoty velikosti ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce ze slitiny zinku ZnAl4Cu1 v ocelové formě,  $T_F = 200\text{ °C}$**

<b>Slitina ZnAl4Cu1</b>				
<b>Kovová forma s dutinou Ø 60x70 mm, teplota lití 550 °C</b>				
<b>Číslo měření</b>	<b>Počáteční teplota formy [°C]</b>	<b>Čas tuhnutí odlitku [s]</b>	<b>Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce [mm]</b>	
<b>1.</b>	200	0	Naměřené hodnoty	0; 0; 0; 0; 0; 0; 0
			Střední hodnota	0
			Směrodatná odchylka	0
			Rozptyl	0
			Variační koeficient	0
<b>2</b>	200	15	Naměřené hodnoty	4,2; 4,2; 4,1; 4; 4,1; 4,2; 4
			Střední hodnota	4,11
			Směrodatná odchylka	0,09
			Rozptyl	0,008
			Variační koeficient	0,022
<b>3.</b>	200	30	Naměřené hodnoty	7,6; 7,2; 7,9; 7,1; 8,9; 8,1; 7,5
			Střední hodnota	7,76
			Směrodatná odchylka	0,616
			Rozptyl	0,38
			Variační koeficient	0,079
<b>4.</b>	200	45	Naměřené hodnoty	13,8; 14,2; 13,9; 14,6; 13,7; 13,2; 13,4
			Střední hodnota	13,83
			Směrodatná odchylka	0,472
			Rozptyl	0,222
			Variační koeficient	0,034
<b>5.</b>	200	50	Naměřené hodnoty	18,2; 18,9; 18,4; 18,2; 17,9; 18; 17,8
			Střední hodnota	18,24
			Směrodatná odchylka	0,37
			Rozptyl	0,137
			Variační koeficient	0,02
<b>6.</b>	200	55	Naměřené hodnoty	19,1; 19,4; 18,9; 18,7; 19,2; 19,1; 19,4
			Střední hodnota	19,08
			Směrodatná odchylka	0,254
			Rozptyl	0,065
			Variační koeficient	0,013

**Poznámka:** Tloušťku ztuhlé vrstvy při tuhnutí odlitku tvaru válce lze přepočítat na tloušťku ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru desky:  $\xi_D = \xi_V (1 - \xi_V/60)$



# Příloha č. 13

pokračování

**Tabulka 5.H Naměřené hodnoty velikosti ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce ze slitiny zinku ZnAl4Cu3 v ocelové formě,  $T_F = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$**

<b>Slitina ZnAl4Cu3</b> <b>Kovová forma s dutinou Ø 60x70 mm, teplota lití 550 °C</b>				
Číslo měření	Počáteční teplota formy [°C]	Čas tuhnutí odlitku [s]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce [mm]	
1.	200	0	Naměřené hodnoty	0; 0; 0; 0; 0; 0; 0
			Střední hodnota	0
			Směrodatná odchylka	0
			Rozptyl	0
			Variační koeficient	0
2	200	15	Naměřené hodnoty	4,9; 4,5; 4,9; 4,5; 4,6; 5,1; 4,8
			Střední hodnota	4,76
			Směrodatná odchylka	0,23
			Rozptyl	0,053
			Variační koeficient	0,048
3.	200	30	Naměřené hodnoty	14,4; 12,8; 14,5; 13,8; 14,1; 14,3; 14,4
			Střední hodnota	14,04
			Směrodatná odchylka	0,597
			Rozptyl	0,356
			Variační koeficient	0,042
4.	200	45	Naměřené hodnoty	18,3; 17,8; 18,4; 18,6; 18,5; 17,8; 18
			Střední hodnota	18,20
			Směrodatná odchylka	0,332
			Rozptyl	0,11
			Variační koeficient	0,018
5.	200	50	Naměřené hodnoty	19,9; 19,7; 20,1; 20; 19,8; 19,6; 20,2
			Střední hodnota	19,89
			Směrodatná odchylka	0,216
			Rozptyl	0,047
			Variační koeficient	0,011
6.	200	55	Naměřené hodnoty	20,5; 20,3; 20,6; 20,4; 20,8; 20,7; 20,2
			Střední hodnota	20,51
			Směrodatná odchylka	0,216
			Rozptyl	0,047
			Variační koeficient	0,011

**Poznámka:** Tloušťku ztuhlé vrstvy při tuhnutí odlitku tvaru válce lze přepočítat na tloušťku ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru desky:  $\xi_D = \xi_V (1 - \xi_V/60)$

**Tabulka 5.I Naměřené hodnoty velikosti ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce z čistého zinku ve formě z CT směsi**

<b>Zinek</b> <b>Forma z CT směsi s dutinou Ø 60x70 mm, teplota lití 550 °C</b>			
Číslo měření	Čas tuhnutí odlitku [s]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce [mm]	
1.	0	Naměřené hodnoty	0; 0; 0; 0; 0; 0; 0
		Střední hodnota	0
		Směrodatná odchylka	0
		Rozptyl	0
		Variační koeficient	0
2	15	Naměřené hodnoty	0,76; 0,79; 0,78; 0,77; 0,75; 0,81; 0,8
		Střední hodnota	0,78
		Směrodatná odchylka	0,022
		Rozptyl	0,0005
		Variační koeficient	0,028
3.	30	Naměřené hodnoty	1,06; 1,08; 1,05; ;1,02; 1,04; 1,03; 1,07
		Střední hodnota	1,05
		Směrodatná odchylka	0,02
		Rozptyl	0,0005
		Variační koeficient	0,021
4.	45	Naměřené hodnoty	2,13; 2,14; 2,14; 2,12; 2,15; 2,14; 2,15
		Střední hodnota	2,14
		Směrodatná odchylka	0,011
		Rozptyl	0,0001
		Variační koeficient	0,005
5.	50	Naměřené hodnoty	4,76; 4,74; 4,78; 4,75; 4,73; 4,77; 4,75
		Střední hodnota	4,75
		Směrodatná odchylka	0,017
		Rozptyl	0,0003
		Variační koeficient	0,0036
6.	55	Naměřené hodnoty	9,9; 9,7; 9,8; 9,6; 9,8; 10; 9,8
		Střední hodnota	9,8
		Směrodatná odchylka	0,129
		Rozptyl	0,017
		Variační koeficient	0,013

**Poznámka:** Tloušťku ztuhlé vrstvy při tuhnutí odlitku tvaru válce lze přepočítat na tloušťku ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru desky:  $\xi_D = \xi_V (1 - \xi_V/60)$

**Příloha č. 13**

**pokračování**

**Tabulka 5.J Naměřené hodnoty velikosti ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce ze slitiny zinku ZnAl4 ve formě z CT směsi**

<b>Slitina ZnAl4</b> <b>Forma z CT směsi s dutinou Ø 60x70 mm, teplota lití 550 °C</b>			
Číslo měření	Čas tuhnutí odlitku [s]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce [mm]	
<b>1.</b>	<b>0</b>	Naměřené hodnoty	0; 0; 0; 0; 0; 0; 0
		Střední hodnota	0
		Směrodatná odchylka	0
		Rozptyl	0
		Variační koeficient	0
<b>2</b>	<b>15</b>	Naměřené hodnoty	0,83; 0,81; 0,84; 0,82; 0,8; 0,81; 0,79
		Střední hodnota	0,81
		Směrodatná odchylka	0,017
		Rozptyl	0,0003
		Variační koeficient	0,021
<b>3.</b>	<b>30</b>	Naměřené hodnoty	1,82; 1,85; 1,84; 1,85; 1,86; 1,84; 1,83
		Střední hodnota	1,84
		Směrodatná odchylka	0,013
		Rozptyl	0,0002
		Variační koeficient	0,007
<b>4.</b>	<b>45</b>	Naměřené hodnoty	3,5; 3,47; 3,52; 3,51; 3,49; 3,5; 3,48
		Střední hodnota	3,5
		Směrodatná odchylka	0,017
		Rozptyl	0,0003
		Variační koeficient	0,005
<b>5.</b>	<b>50</b>	Naměřené hodnoty	7,51; 7,54; 7,52; 7,53; 7,5; 7,51; 7,53
		Střední hodnota	7,52
		Směrodatná odchylka	0,014
		Rozptyl	0,0002
		Variační koeficient	0,002
<b>6.</b>	<b>55</b>	Naměřené hodnoty	1,09; 1,07; 1,1; 1,08; 1,11; 1,09; 1,08
		Střední hodnota	1,09
		Směrodatná odchylka	0,013
		Rozptyl	0,0002
		Variační koeficient	0,012

**Poznámka:** Tloušťku ztuhlé vrstvy při tuhnutí odlitku tvaru válce lze přepočítat na tloušťku ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru desky:  $\xi_D = \xi_V (1 - \xi_V/60)$

**Příloha č. 13**

pokračování

**Tabulka 5.K Naměřené hodnoty velikosti ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce ze slitiny zinku ZnAl4Cu1 ve formě z CT směsi**

<b>Slitina ZnAl4Cu1</b> <b>Forma z CT směsi s dutinou Ø 60x70 mm, teplota lití 550 °C</b>			
Číslo měření	Čas tuhnutí odlitku [s]	Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce [mm]	
1.	0	Naměřené hodnoty	0; 0; 0; 0; 0; 0; 0
		Střední hodnota	0
		Směrodatná odchylka	0
		Rozptyl	0
		Variační koeficient	0
2	15	Naměřené hodnoty	0,94; 0,92; 0,95; 0,93; 0,94; 0,95; 0,93
		Střední hodnota	0,94
		Směrodatná odchylka	0,011
		Rozptyl	0,0001
		Variační koeficient	0,012
3.	30	Naměřené hodnoty	2,36; 2,34; 2,33; 2,37; 2,38; 2,35; 2,36
		Střední hodnota	2,36
		Směrodatná odchylka	0,017
		Rozptyl	0,0003
		Variační koeficient	0,007
4.	45	Naměřené hodnoty	4,8; 4,9; 5; 4,7; 4,9; 5,1; 4,7
		Střední hodnota	4,89
		Směrodatná odchylka	0,15
		Rozptyl	0,022
		Variační koeficient	0,031
5.	50	Naměřené hodnoty	8,4; 8,5; 8,6; 8,7; 8,2; 8,3; 8,4
		Střední hodnota	8,4
		Směrodatná odchylka	0,171
		Rozptyl	0,030
		Variační koeficient	0,020
6.	55	Naměřené hodnoty	1,22; 1,24; 1,2; 1,25; 1,24; 1,25; 1,24
		Střední hodnota	1,24
		Směrodatná odchylka	0,018
		Rozptyl	0,0003
		Variační koeficient	0,015

**Poznámka:** Tloušťku ztuhlé vrstvy při tuhnutí odlitku tvaru válce lze přepočítat na tloušťku ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru desky:  $\xi_D = \xi_V (1 - \xi_V/60)$

**Příloha č. 13**

pokračování

**Tabulka 5.L Naměřené hodnoty velikosti ztuhlé vrstvy odlitku tvaru válce ze slitiny zinku ZnAl4Cu3 ve formě z CT směsi**

<b>Slitina ZnAl4Cu3</b> <b>Forma z CT směsi s dutinou Ø 60x70 mm, teplota lití 550 °C</b>			
<b>Číslo měření</b>	<b>Čas tuhnutí odlitku [s]</b>	<b>Ztuhlá vrstva odlitku tvaru válce [mm]</b>	
<b>1.</b>	<b>0</b>	Naměřené hodnoty	0; 0; 0; 0; 0; 0; 0
		Střední hodnota	0
		Směrodatná odchylka	0
		Rozptyl	0
		Variační koeficient	0
<b>2</b>	<b>15</b>	Naměřené hodnoty	0,99; 1,01; 0,98; 1,02; 0,97; 0,99; 0,98
		Střední hodnota	0,99
		Směrodatná odchylka	0,018
		Rozptyl	0,0003
		Variační koeficient	0,018
<b>3.</b>	<b>30</b>	Naměřené hodnoty	2,85; 2,87; 2,89; 2,88; 2,86; 2,86; 2,88
		Střední hodnota	2,87
		Směrodatná odchylka	0,014
		Rozptyl	0,0002
		Variační koeficient	0,005
<b>4.</b>	<b>45</b>	Naměřené hodnoty	6,4; 6,5; 6,7; 6,3; 6,5; 6,6; 6,7
		Střední hodnota	6,5
		Směrodatná odchylka	0,15
		Rozptyl	0,022
		Variační koeficient	0,023
<b>5.</b>	<b>50</b>	Naměřené hodnoty	9,8; 9,5; 10; 9,8; 9,9; 9,7; 9,8
		Střední hodnota	9,8
		Směrodatná odchylka	0,16
		Rozptyl	0,025
		Variační koeficient	0,016
<b>6.</b>	<b>55</b>	Naměřené hodnoty	1,73; 1,71; 1,74; 1,75; 1,72; 1,74; 1,73
		Střední hodnota	1,73
		Směrodatná odchylka	0,013
		Rozptyl	0,0002
		Variační koeficient	0,008

**Poznámka:** Tloušťku ztuhlé vrstvy při tuhnutí odlitku tvaru válce lze přepočítat na tloušťku ztuhlé vrstvy pro odlitek tvaru desky:  $\xi_D = \xi_V (1 - \xi_V/60)$

## Příloha č. 14

Hodnoty součinitele lineárního smrštění, resp. roztažení [13], [25], [48], [49]

Materiál		Součinitel lineární teplotní roztažnosti $\alpha^*$ [K <sup>-1</sup> ]
Zinek	20 – 100 °C	29,2 .10 <sup>-6</sup>
ZnAl4		27,4 .10 <sup>-6</sup>
ZnAl4Cu1		27,4 .10 <sup>-6</sup>
ZnAl4Cu3		27,8 .10 <sup>-6</sup>
Hliník	20 –	22,4 .10 <sup>-6</sup>
100 °C		
Slitiny hliníku	20 - 100 °C	22 .10 <sup>-6</sup>
Olovo	20 - 100 °C	29,3 .10 <sup>-6</sup>
Litina s lupínkovým grafitem	20 - 100 °C	9,5 .10 <sup>-6</sup>
	20 - 200 °C	12 .10 <sup>-6</sup>
	200 - 300 °C	15,2 .10 <sup>-6</sup>
	500 - 600 °C	15,7 .10 <sup>-6</sup>
	800 - 900 °C	32 .10 <sup>-6</sup>
Mosaz (Cu62Zn38)	20 - 100 °C	18,4 .10 <sup>-6</sup>
Ocel (0,6%C)	20 - 100 °C	11 .10 <sup>-6</sup>

**Odlitky použití pro sledování struktury slitin zinku**

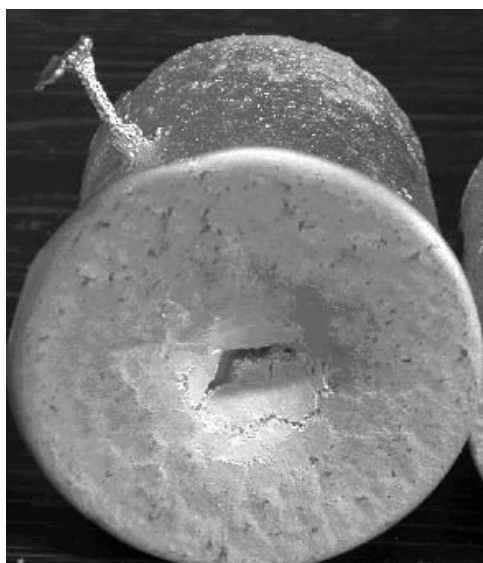
Odlitek litý tlakově ze slitiny ZnAl4



Odlitek litý tlakově ze slitiny ZnAl4Cu1



Typ odlitku litého gravitačně do formy z CT směsi a do kovové formy



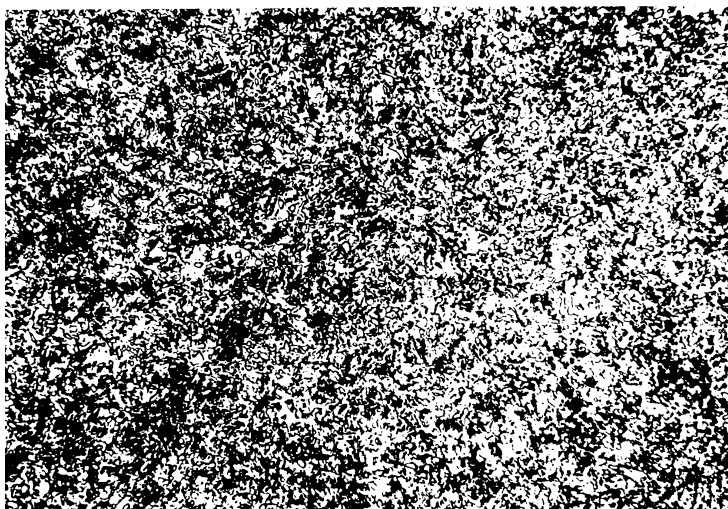
## **Ocel ČSN 19552 (ekvivalentní je ocel EN X38CrMoV5-1)**

**Ocel legovaná Cr-Mo-Si-V** je speciální pro práci za tepla, ke kalení na vzduchu (tváří se z polotovaru při teplotě cca 1100 °C).

**Chemické složení:** 0,3 až 0,4 % C; 0,20 až 0,50 % Mn; 0,80 až 1,20 % Si; 4,5 až 5,5 % Cr; 1,1 až 1,7 % Mo; 0,35 % V; max. 0,035 % S; max. 0,035 % P.

**Tepelné zpracování** (legované nástrojové oceli se pomalu prohřívají):

- žhánění na měkko při teplotě cca 800 °C, ohřev po dobu 4 až 8 hodin na uvedenou teplotu, pomalé ochlazování v peci;
- žhánění na snížení pnutí cca 750 °C, ohřev po dobu 1 až 2 hodiny na uvedenou teplotu, pak pomalé ochlazování v peci;
- kalení z teploty 1050 °C, ohřev dle velikosti součásti cca 4 hodiny na klidném vzduchu;
- popouštění ohřev na teploty 600 °C, po dobu cca 4 hodiny, pomalé ochlazování v peci (vylučují se karbidy legujících prvků).

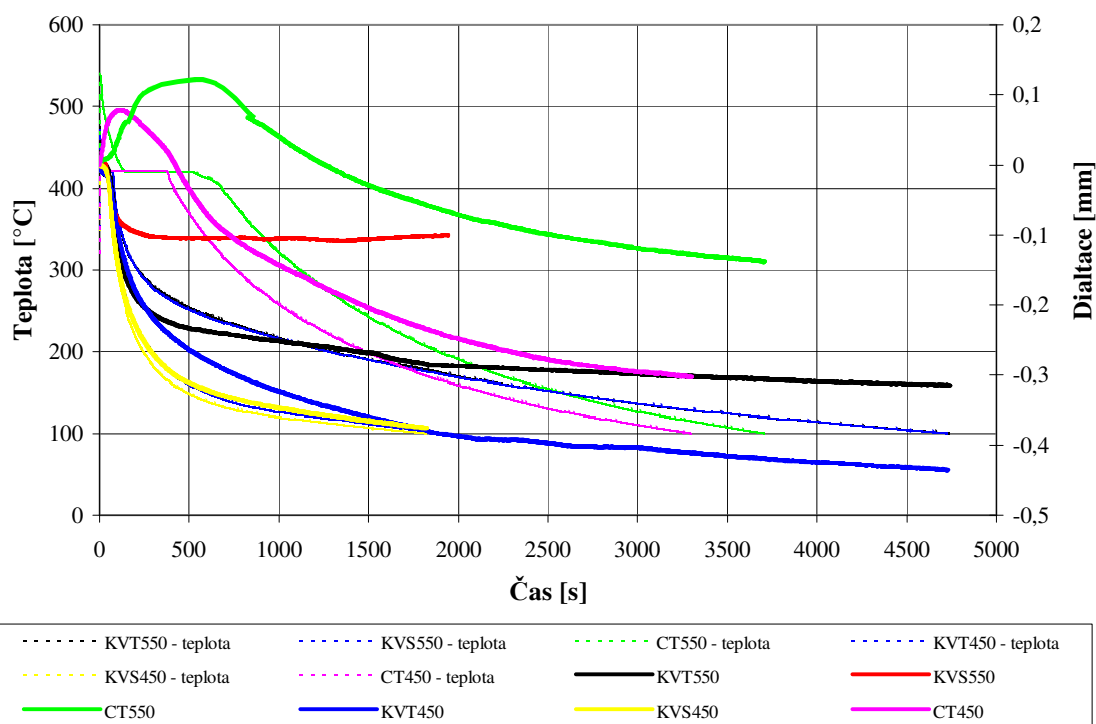


Vilella-Bain 500 x  
Sorbitická struktura ocele ČSN 19552  
(kaleno z teploty 1050 °C a popouštěno na teplotu 600 °C)



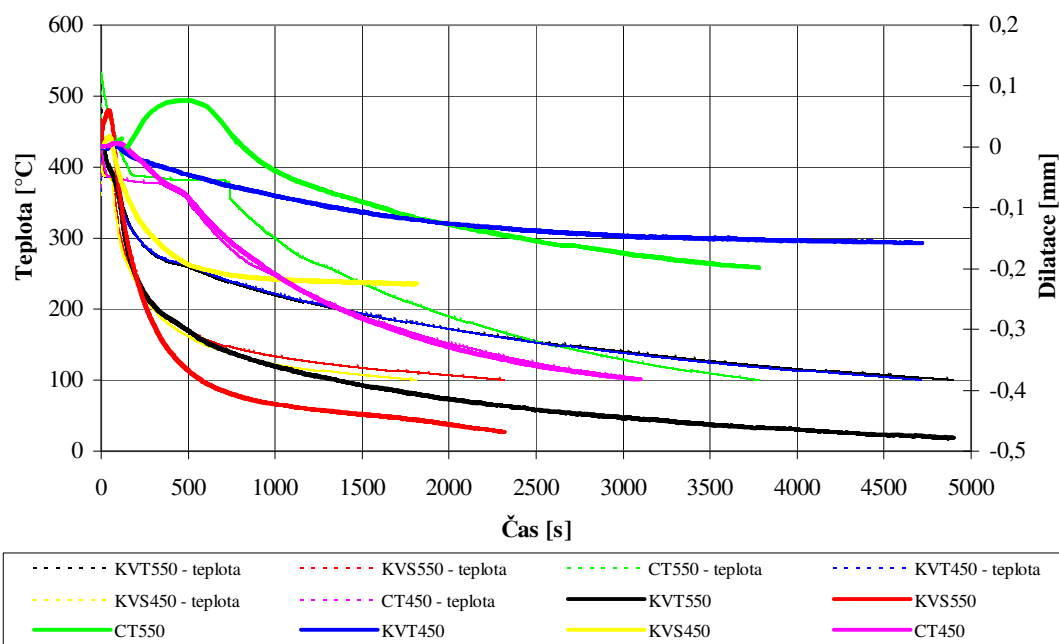
# Průběhy dilatační analýzy z I. etapy experimentálních měření

## Čistý zinek



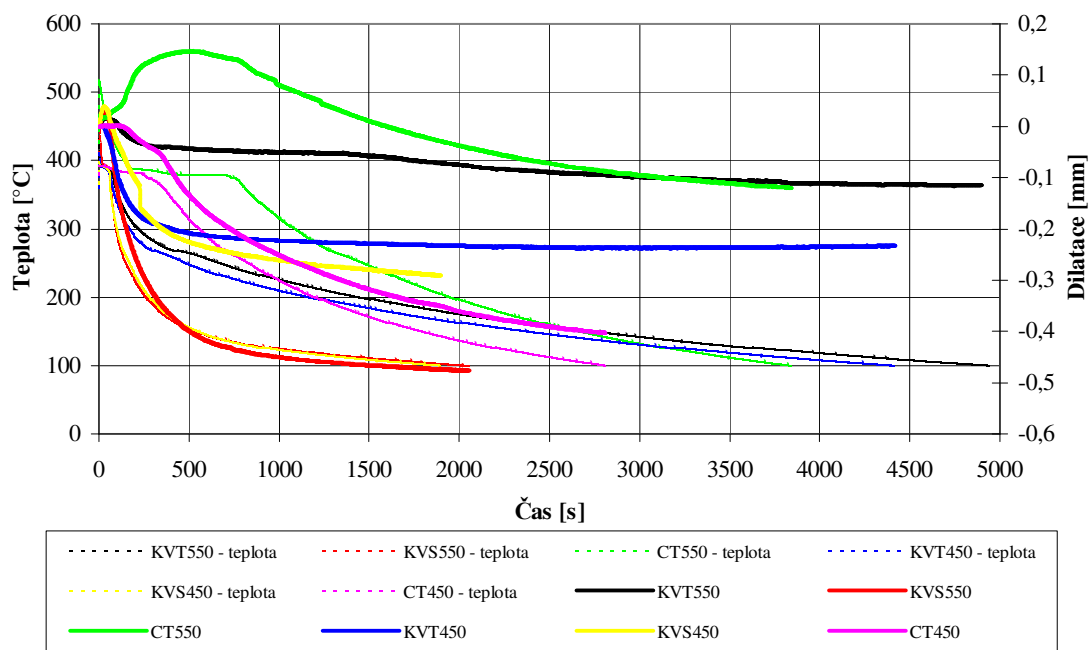
Průběh dilatační analýzy odlitku z čistého zinku - různé typy formy a teploty lití  
450 a 550 °C

## Slitina ZnAl4



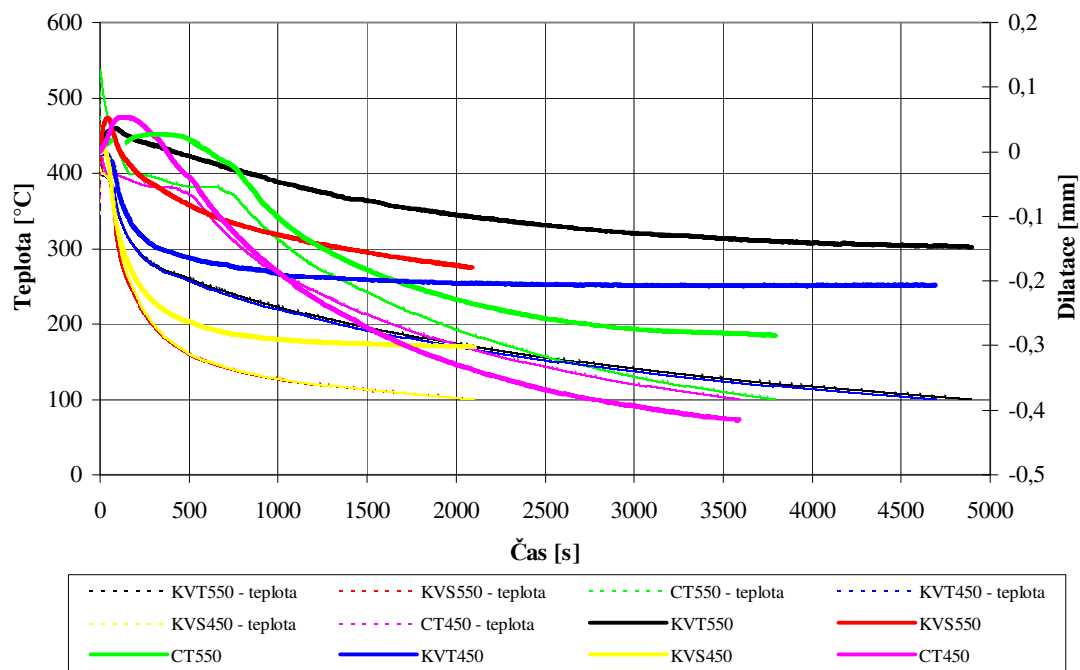
Průběh dilatační analýzy odlitku ze slitiny ZnAl4 - různé typy formy a teploty lití

### Slitina ZnAl4Cu1



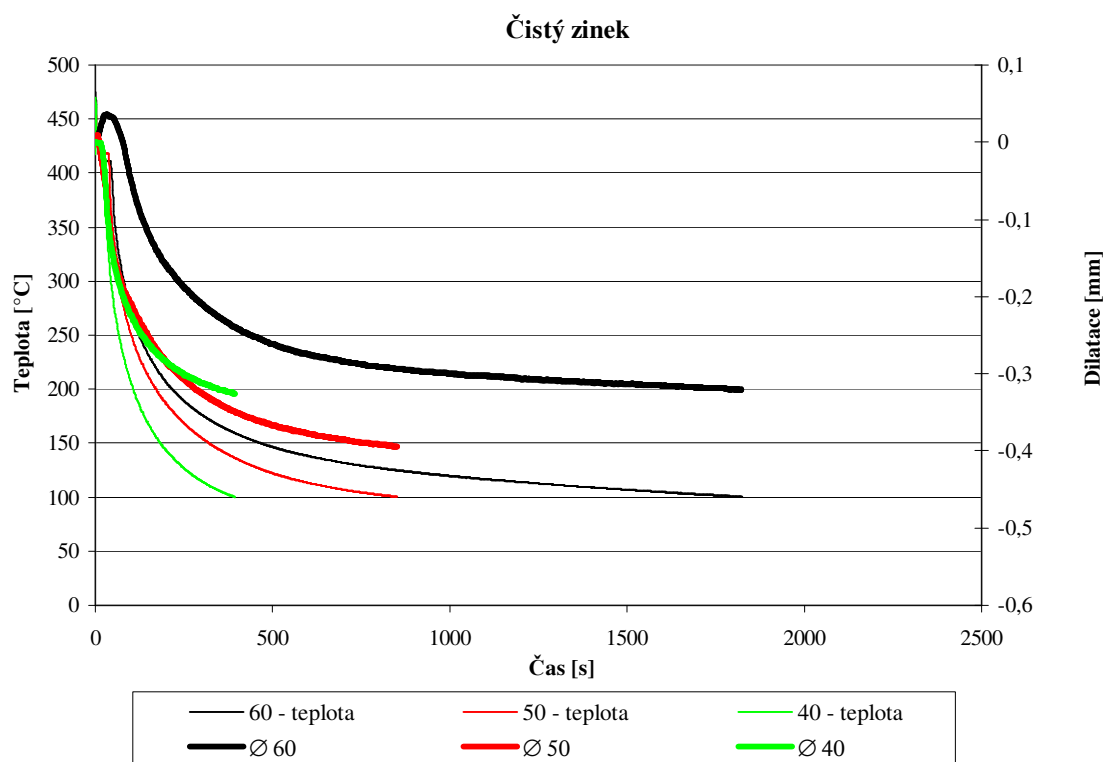
Průběh dilatační analýzy odlitku ze slitiny ZnAl4Cu1 - různé typy formy a teploty lití  
450 a 550 °C

### Slitina ZnAl4Cu3

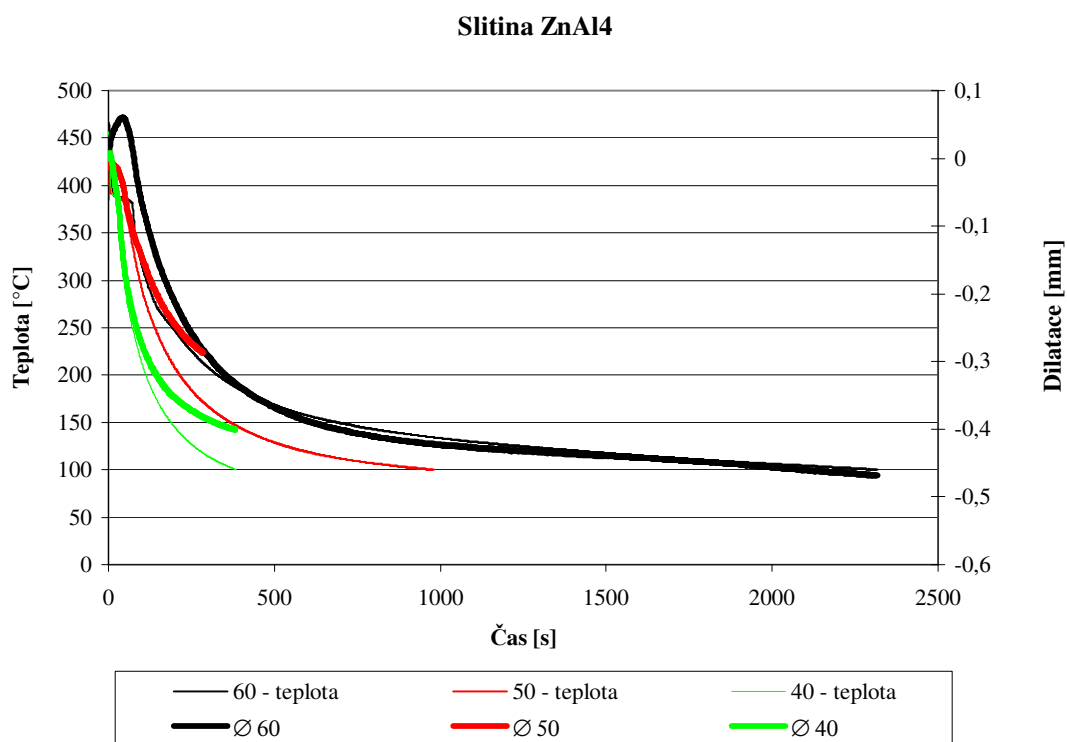


Průběh dilatační analýzy odlitku ze slitiny ZnAl4Cu3 - různé typy formy a teploty  
lití 450 a 550 °C

Průběhy dilatační analýzy z II. experimentálních měření

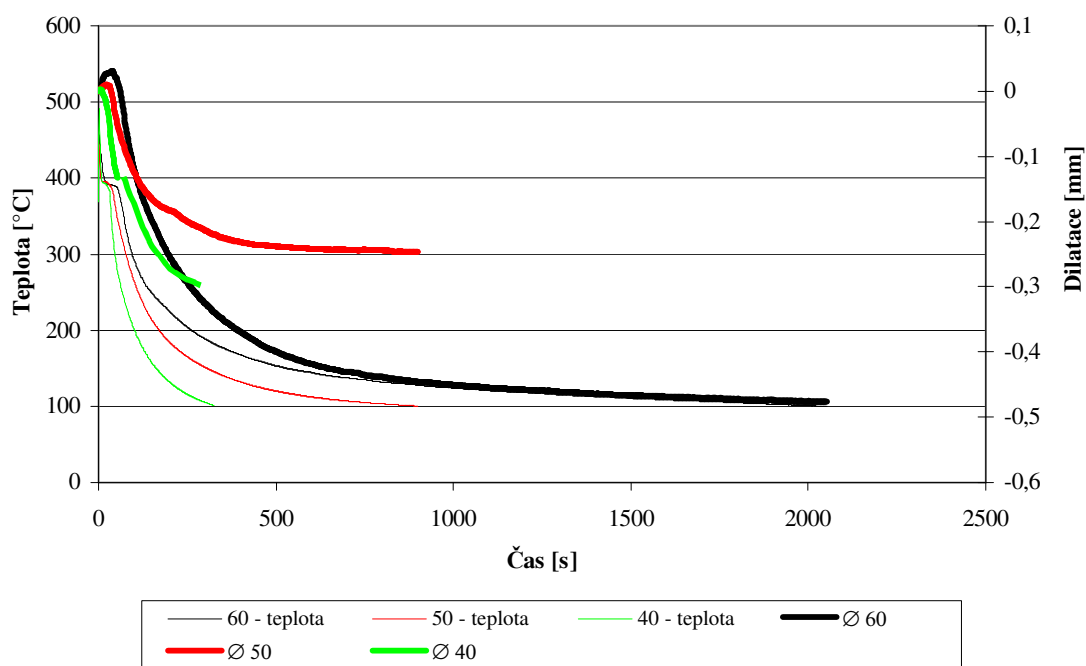


Průběh dilatační analýzy odlitku z čistého zinku - různé průměry formy



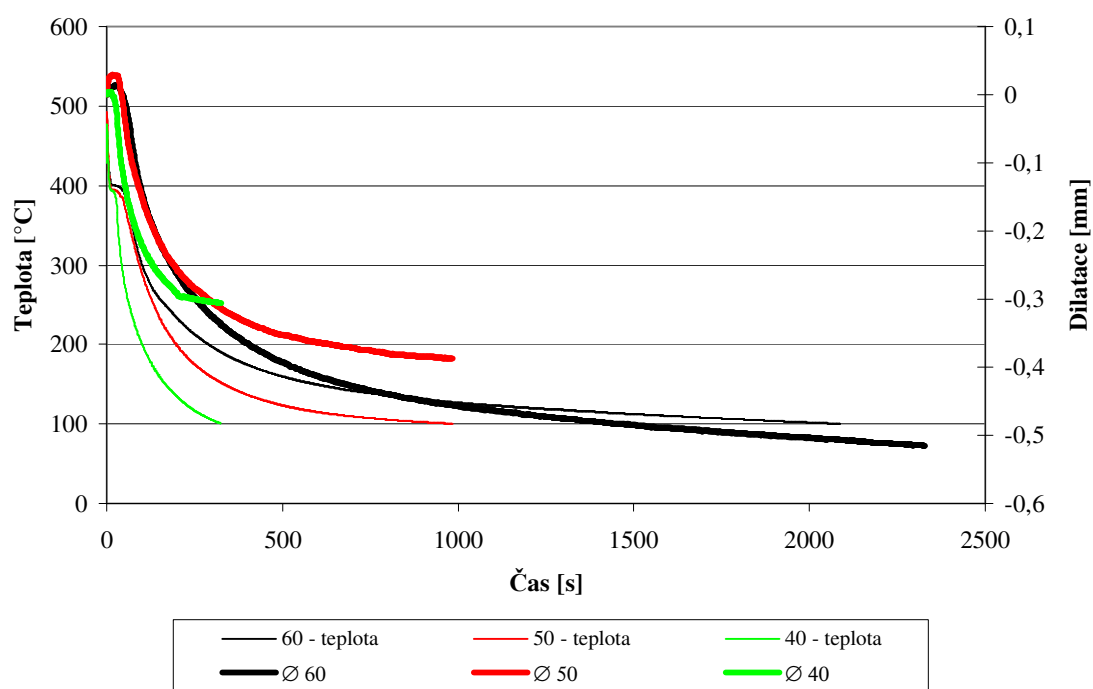
Průběh dilatační analýzy odlitku ze slitiny ZnAl4 - různé průměry formy

### ZnAl4Cu1



Průběh dilatační analýzy odlitku ze slitiny ZnAl4Cu1 - různé průměry formy

### ZnAl4Cu3



Průběh dilatační analýzy odlitku ze slitiny ZnAl4Cu3 - různé průměry formy

### Technické parametry karty PCLD - 718, multiplexeru PCLD 789:

- programové rozlišení 16 až 22 bitů;
- nelinearita typ. 0,0003 %;
- maximální chyba 0,005 % z údaje;
- propojením multiplexeru lze získat 126 měřených míst;
- zesílení signálu 100 násobné;
- rozlišení při měření teploty studeného konce 0,1 °C; přesnost 0,2 až 0,5 °C;
- teplotní drift typ 20 ppm/K

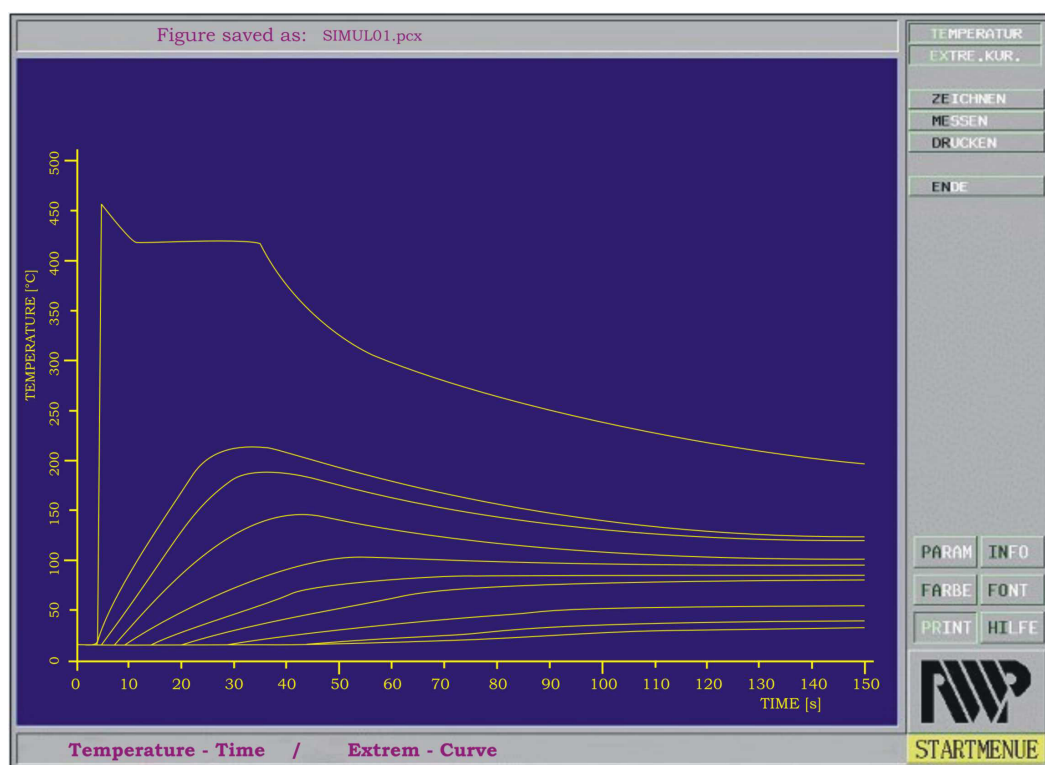
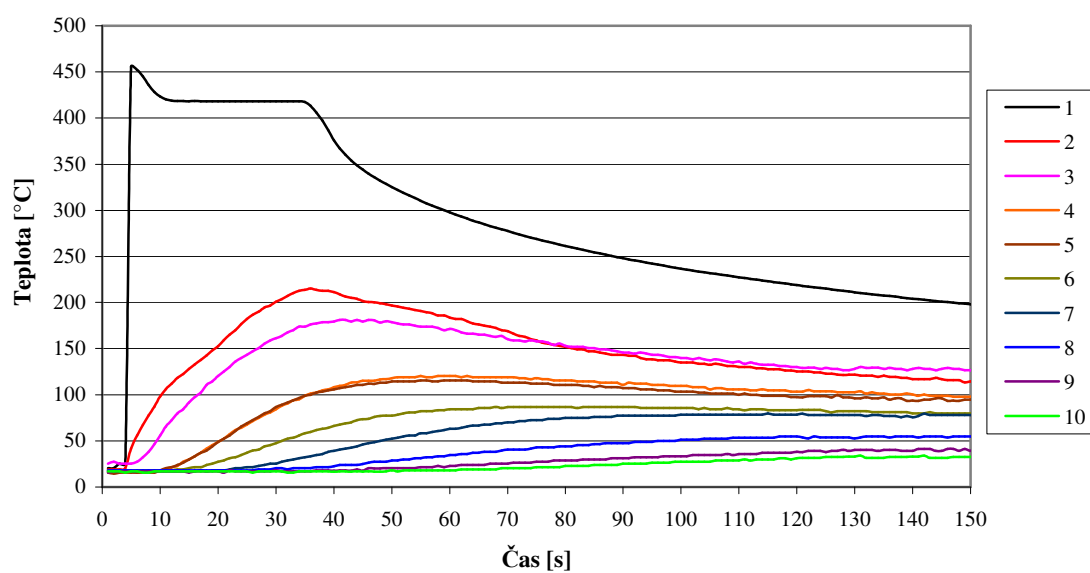
### Měřicí zařízení spolu se slévárenskou musí splňovat tyto požadavky:

- velikost, tvar a dutina formy musí v určité míře zajišťovat nezkreslené podmínky experimentů;
- termoelektrické články, které jsou použity k měření teploty ve slévárenské formě musí být situovány tak, aby potlačily škodlivý vliv odvodu tepla z měřeného místa, nejen svým uložením, ale také vhodnou volbou menšího průřezů termočlánekových vodičů, tak aby byla spolehlivě sledována skutečná teplota;
- měřicí zařízení musí zajistit co nejjednodušší, dostatečně přesný a přehledný způsob zápisu a jednoduché interpretace naměřených hodnot.

## Příloha č. 20

### Měření a simulace časových závislostí teplot v odlitku tvaru deska 200 x160 x 20 mm a v ocelové formě 220x220x220 mm

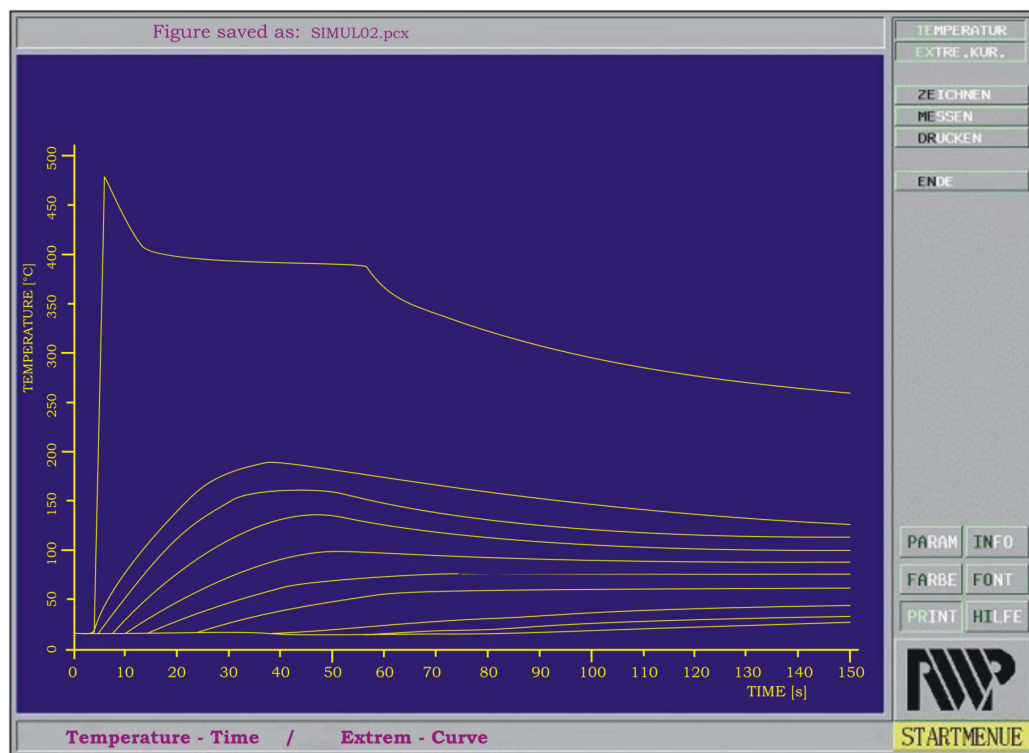
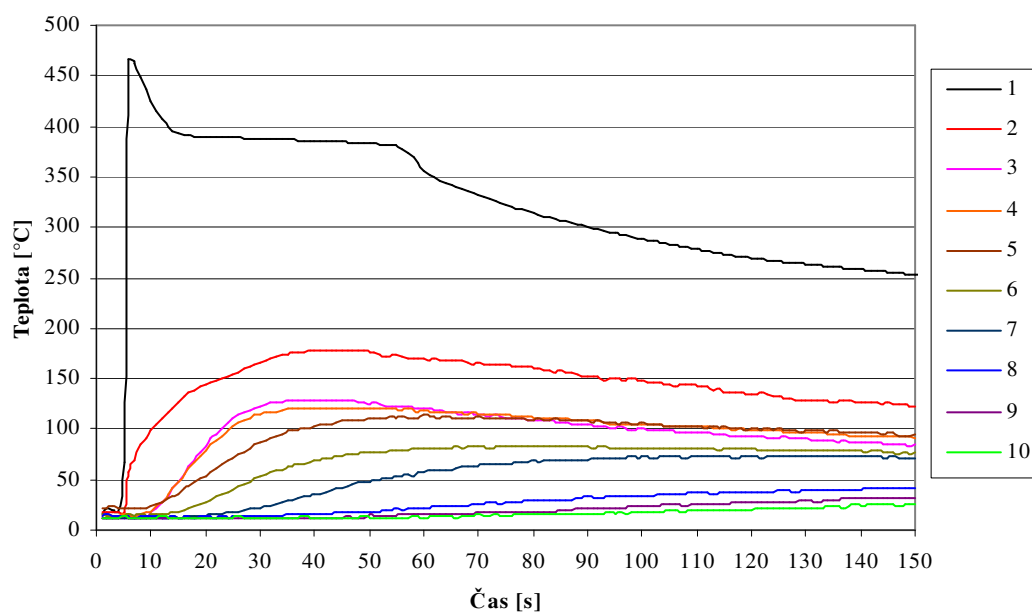
Čistý zinek, teplota formy 20°C



## Příloha č. 20

pokračování

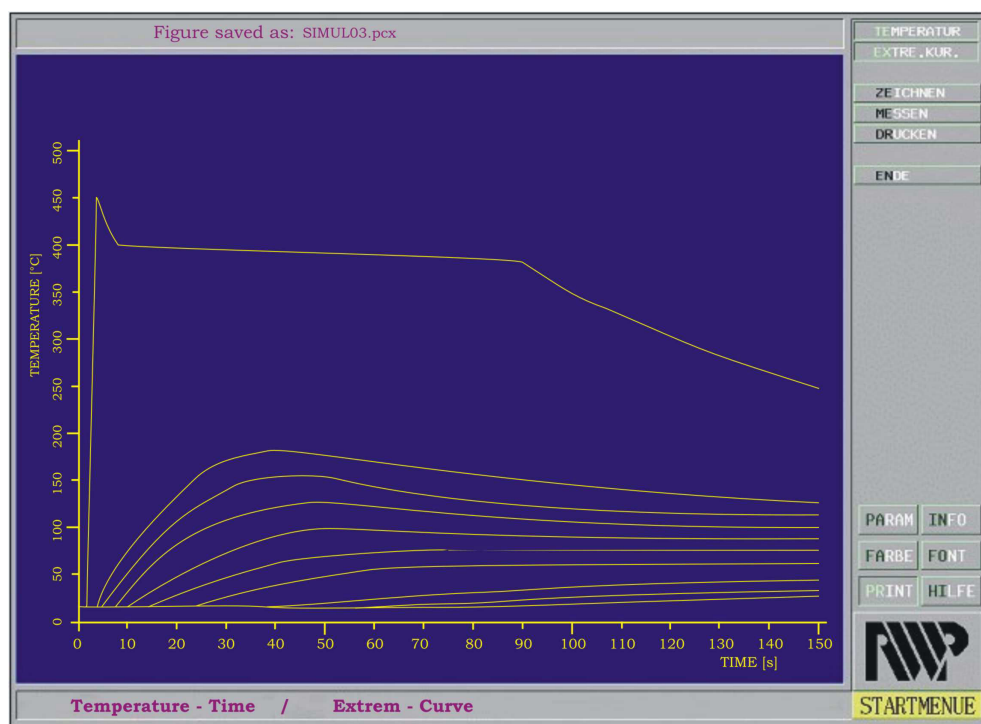
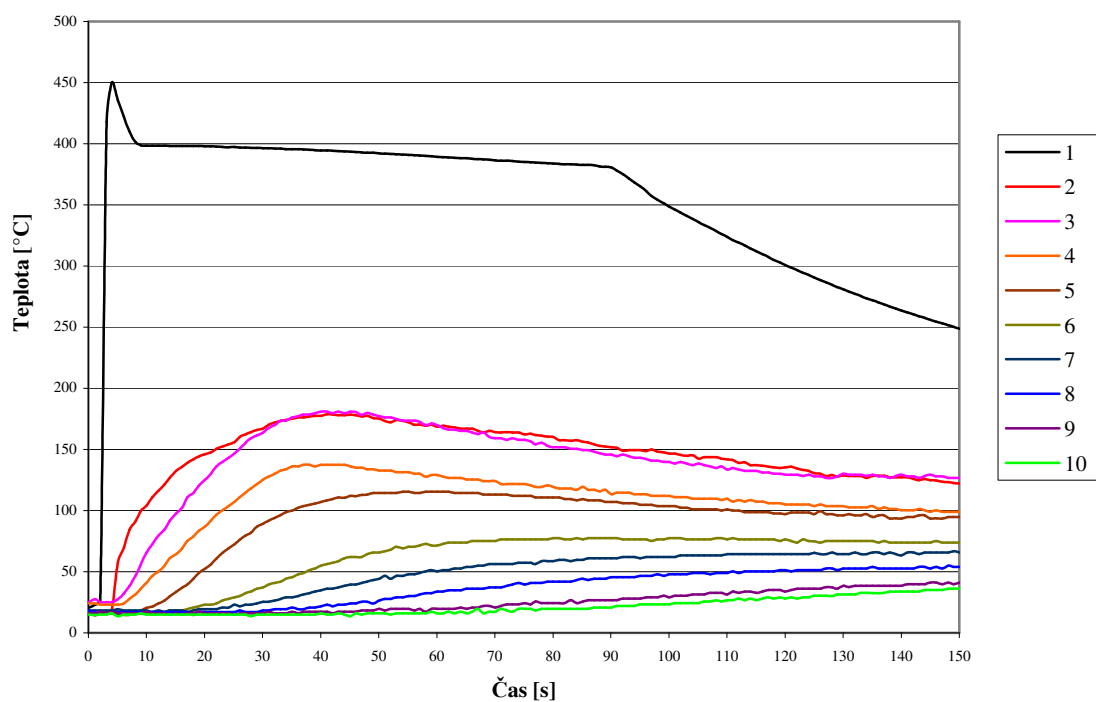
ZnAl4, teplota formy 20°C



## Příloha č. 20

pokračování

ZnAl4Cu1, teplota formy 20°C

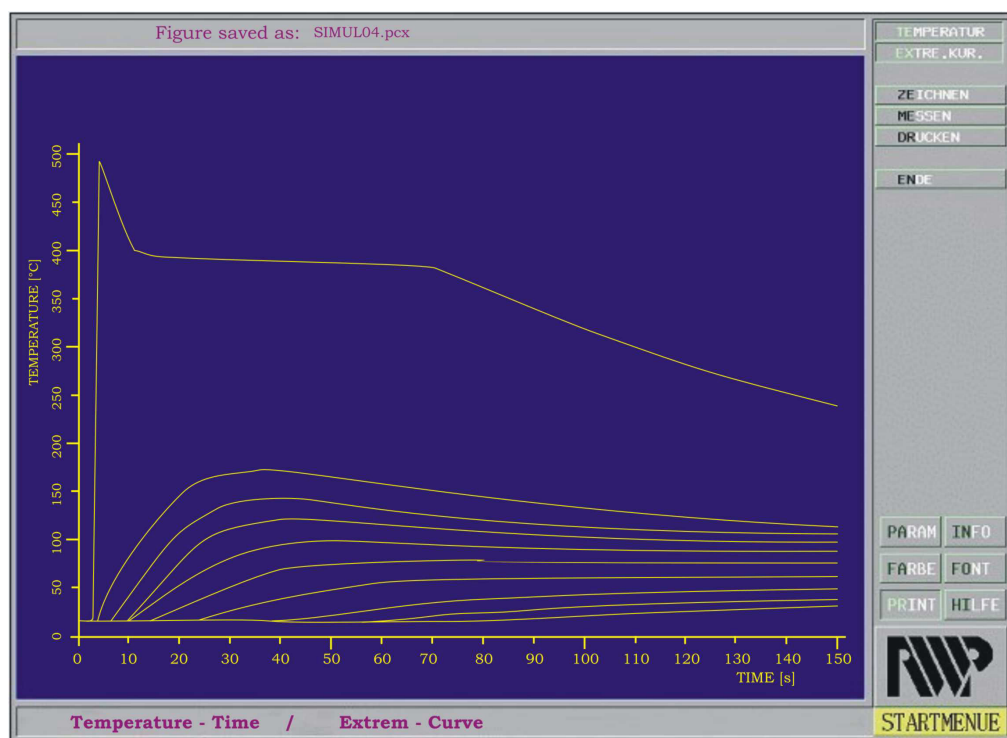
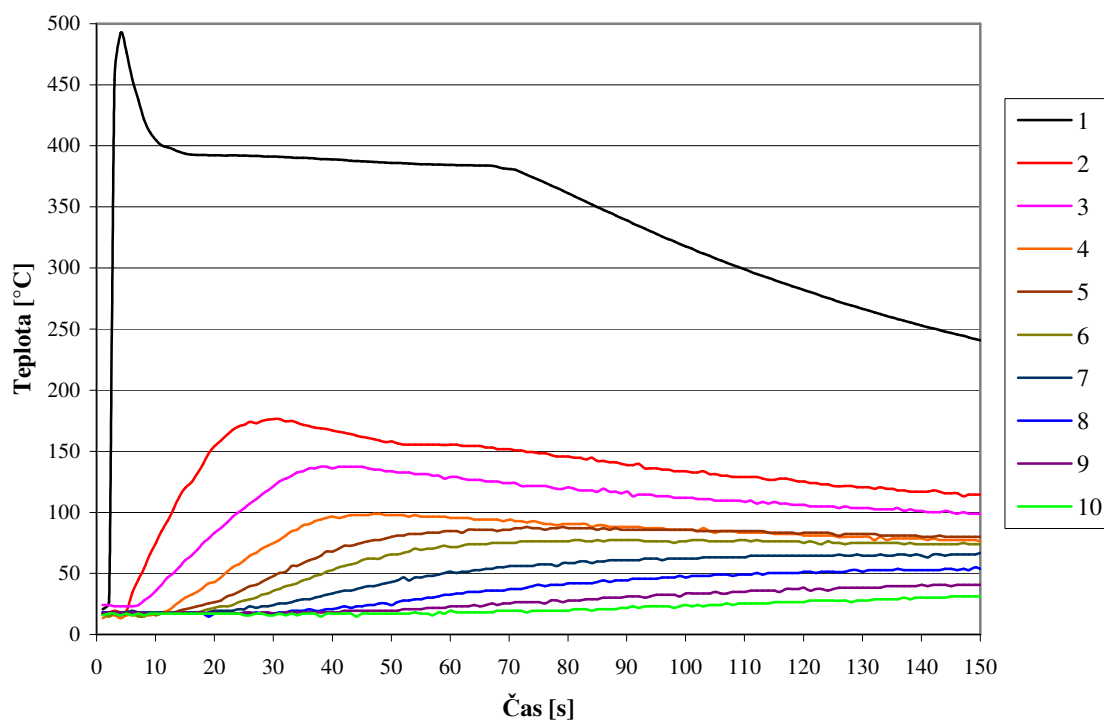




## Příloha č. 20

### pokračování

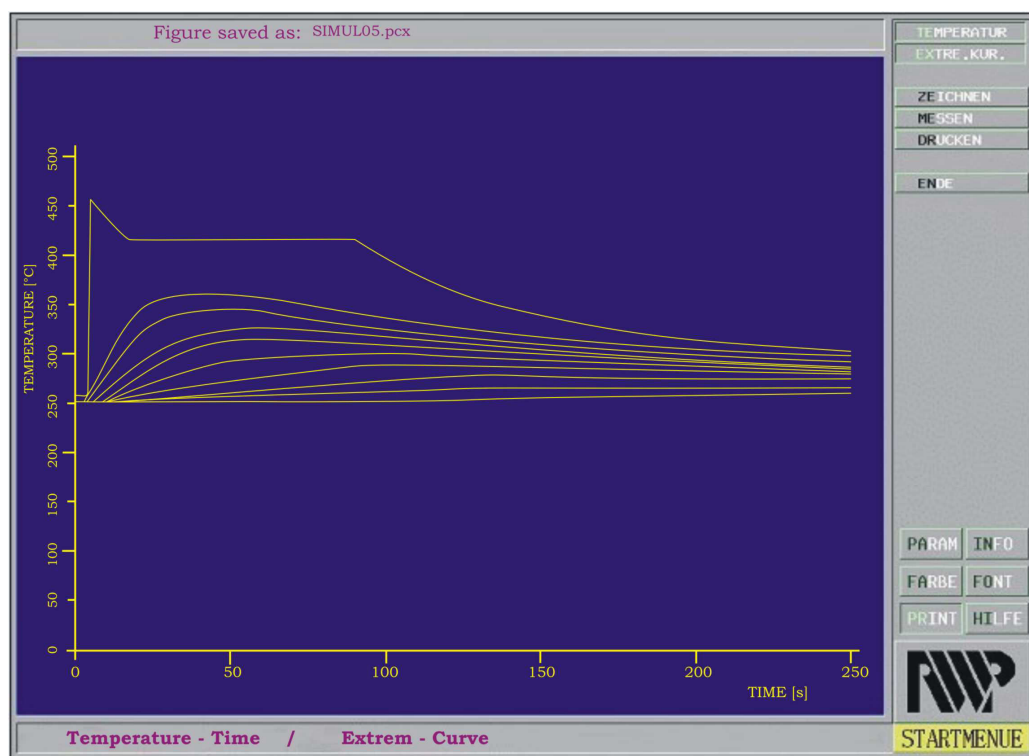
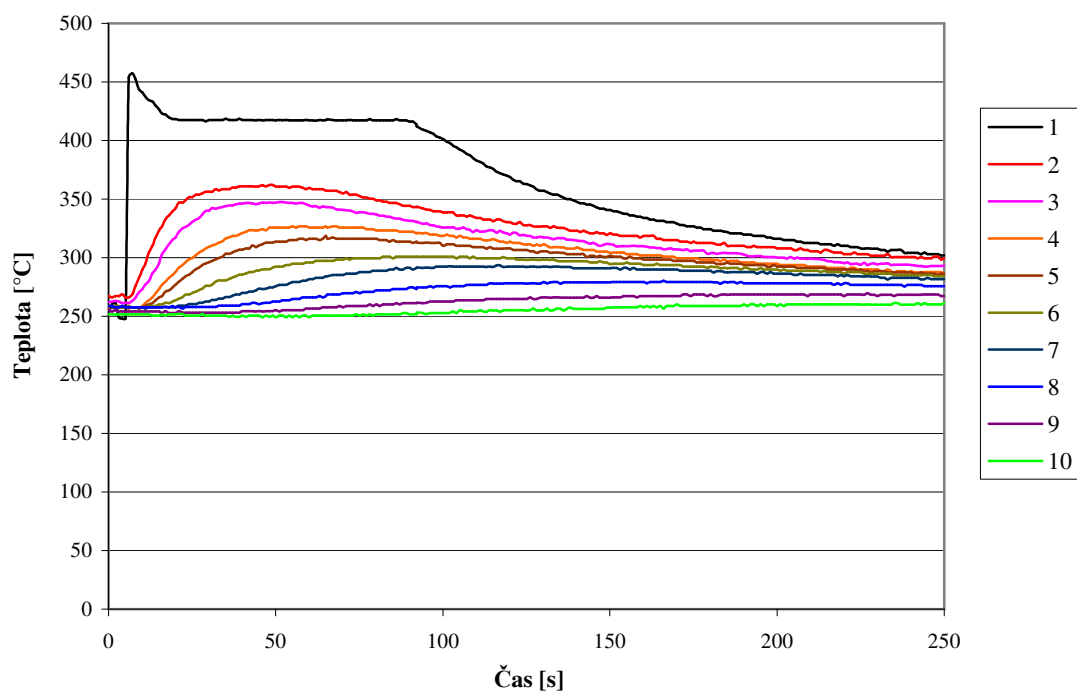
ZnAl4Cu3, teplota formy 20°C



## Příloha č. 20

pokračování

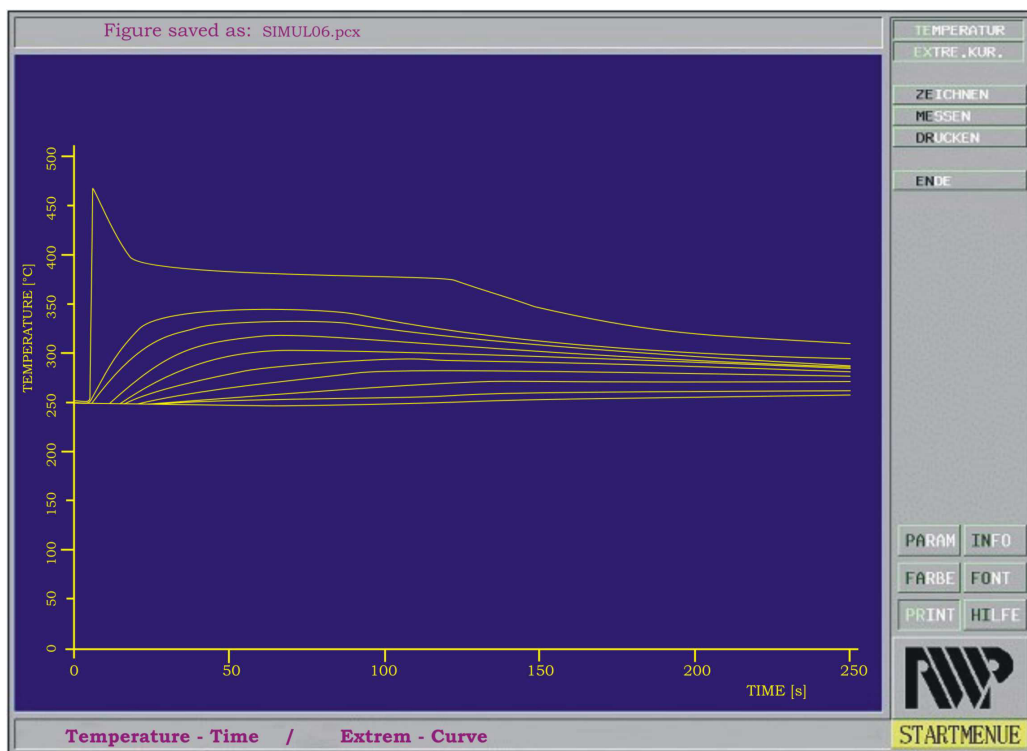
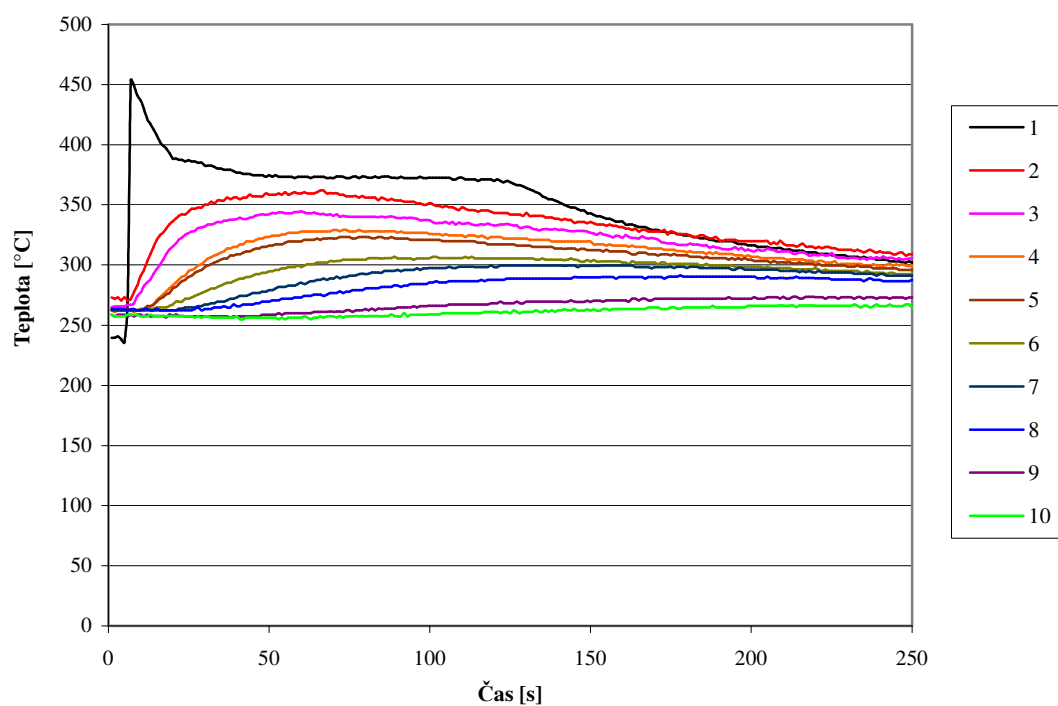
Čistý zinek, teplota formy 250°C



## Příloha č. 20

### pokračování

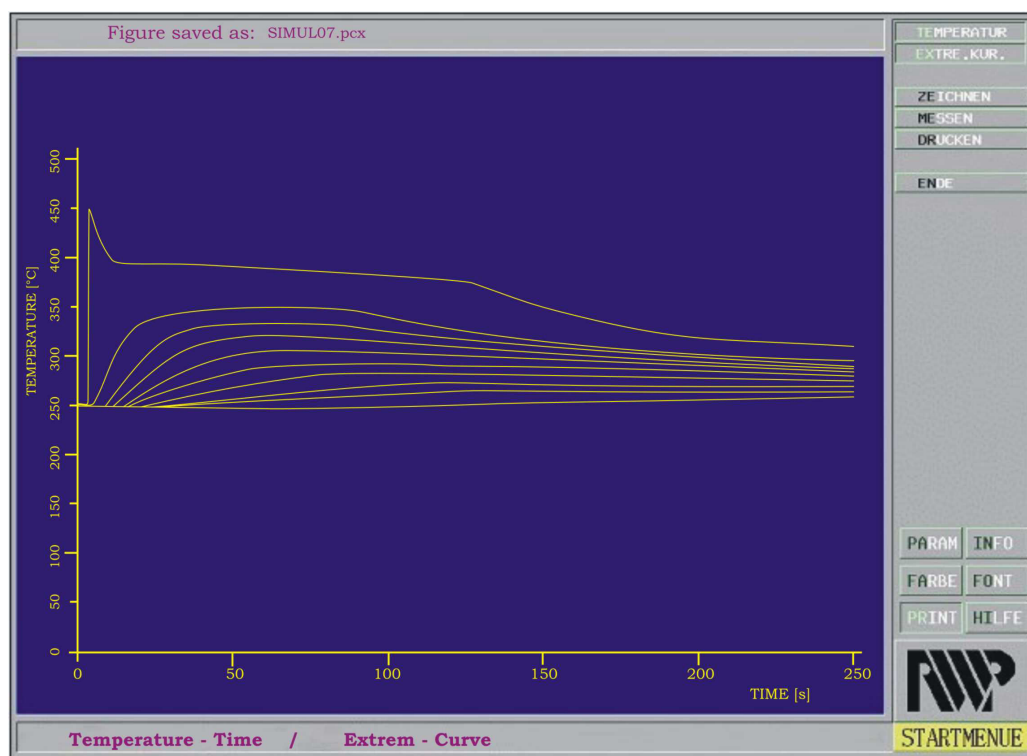
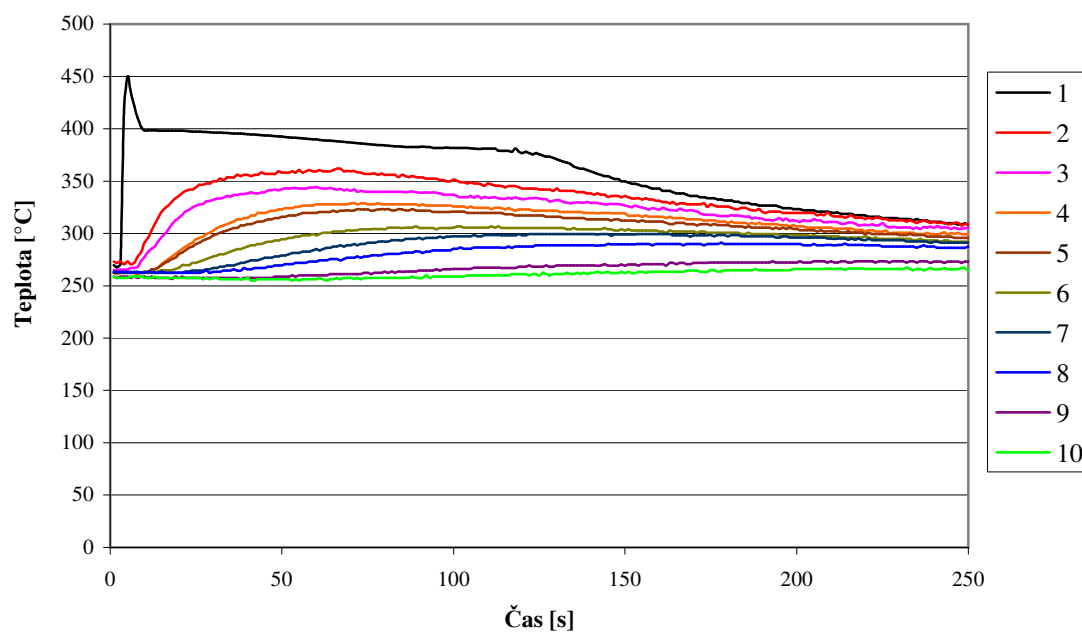
ZnAl4, teplota formy 250°C



## Příloha č. 20

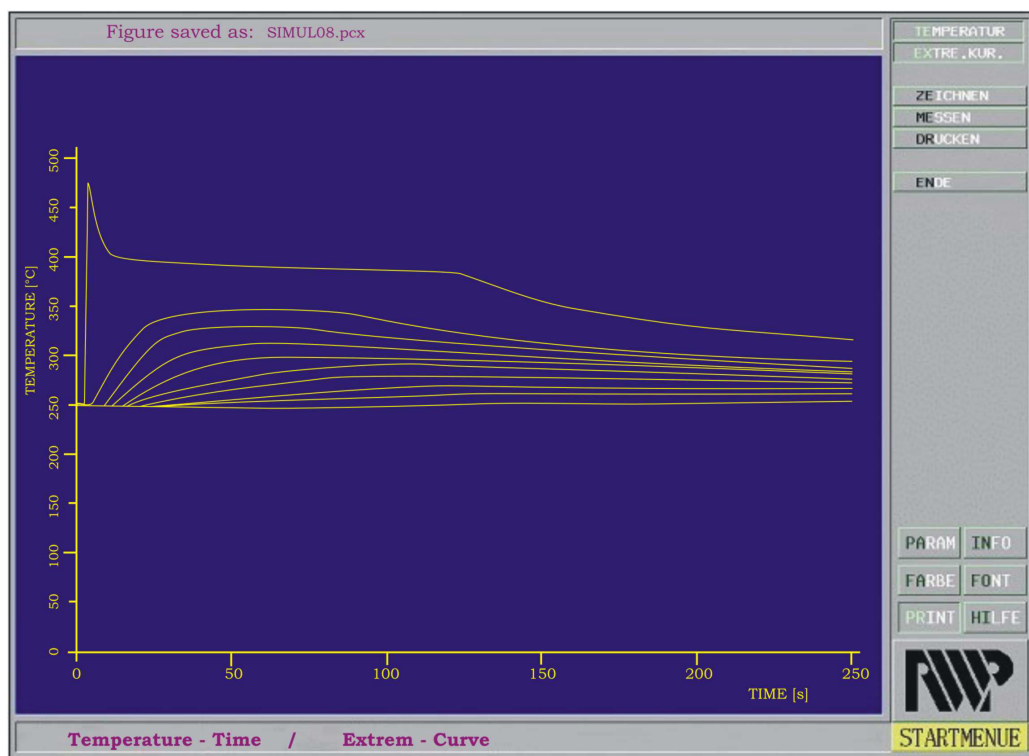
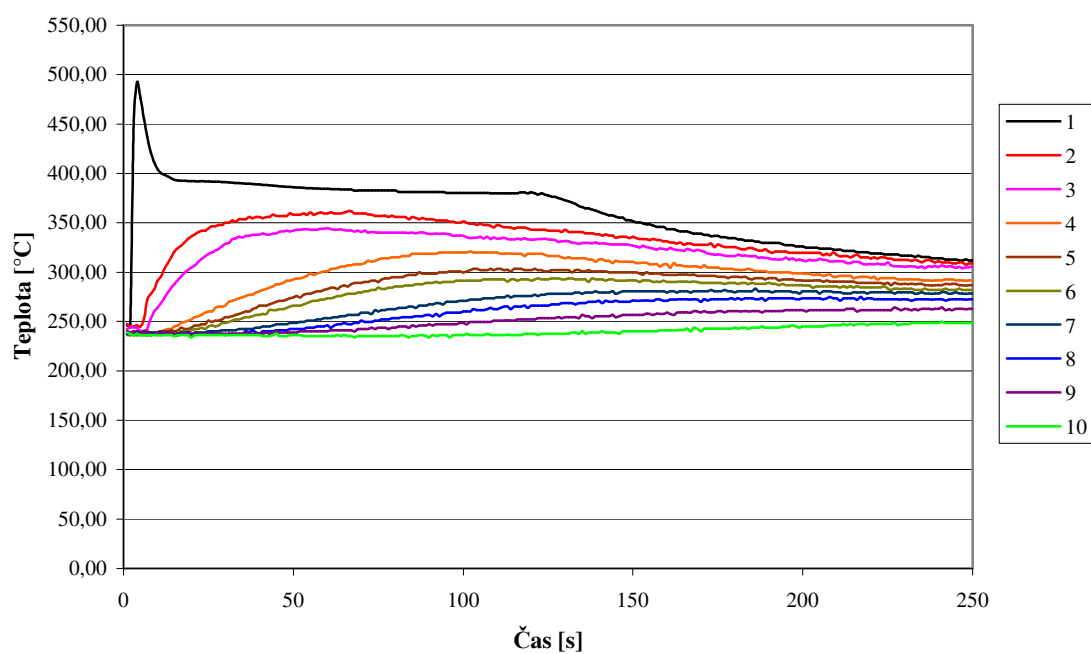
pokračování

ZnAl4Cu1, teplota formy 250°C



# **Příloha č. 20** pokračování

**ZnAl4Cu3, teplota formy 250°C**



## Příloha č. 21

Hodnoty tepelně-fyzikálních veličin, které byly dodány jako vlastní do programu WinCast/SIMTEC pro simulační výpočet

### Součinitel tepelné vodivosti

Teplota [°C]	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]			
	čistý Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
20	110	113	109	105
100	108	115	110	107
200	101	119	114	110
300	98	115	106	107
380	94	105	95	90
389	92	56	54	61
500	88	63	65	68

### Měrná tepelná kapacita

Teplota [°C]	Měrná tepelná kapacita $c$ [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]			
	čistý Zn	ZnAl4	ZnAl4Cu1	ZnAl4Cu3
20	396	419	419	419
100	400	430	430	430
200	405	460	465	465
300	410	525	530	530
380	415	535	540	540
389	415	585	595	595
500	505	590	597	597